



**Paradigmas da sustentabilidade ambiental na geração de energia  
fotovoltaica**

**Paradigms of environmental sustainability in photovoltaic energy generation**

**Paradigmas de sustentabilidad ambiental en la generación de energía  
fotovoltaica**

DOI: 10.55905/rdelosv17.n52-002

Originals received: 01/02/2024

Acceptance for publication: 01/23/2024

**Paloma Couto Neiva Cardoso**

Mestranda em Ciências Florestais

Instituição: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Montes Claros – Minas Gerais, Brasil

E-mail: paloma-couto@hotmail.com

**Stanley Schettino**

Doutor em Ciências Florestais

Instituição: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Montes Claros – Minas Gerais, Brasil

E-mail: schettino@ufmg.br

**Luciano José Minette**

Doutor em Ciências Florestais

Instituição: Universidade Federal de Viçosa

Endereço: Viçosa - Minas Gerais, Brasil

E-mail: minette@ufv.br

**Denise Ransolin Soranso**

Doutora em Ciências Florestais

Instituição: Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá

Endereço: Itajubá – Minas Gerais, Brasil

E-mail: denise\_soranso@unifei.edu.br

**RESUMO**

Este estudo visa aprofundar a compreensão das dimensões ambientais da energia solar, oferecendo insights importantes para formuladores de políticas, pesquisadores e partes interessadas na transição para um futuro energético sustentável. Explorando os paradigmas da sustentabilidade na geração de energia fotovoltaica, o trabalho contribui para uma jornada intelectual e prática em direção a um futuro mais promissor e ecologicamente consciente, especialmente diante da crítica encruzilhada sobre o impacto ambiental. Utilizando revisão bibliográfica com palavras-chave como energia fotovoltaica, sustentabilidade, desenvolvimento sustentável, energias limpas, impacto ambiental e inovações tecnológicas, o estudo examina os



paradigmas da sustentabilidade ambiental na geração de energia solar no Brasil. Destaca a energia solar como fonte limpa e renovável, capaz de reduzir emissões de carbono e mitigar mudanças climáticas. Aborda desafios na produção de materiais e processos industriais dos painéis solares, enfatizando a necessidade de abordagens sustentáveis. Conclui que os paradigmas ambientais refletem diferentes perspectivas sobre a conciliação entre fontes renováveis e proteção ambiental, superando desafios como custo, eficiência e impacto ambiental. Destaca a importância da escolha adequada de locais e práticas de gestão sustentável para minimizar impactos negativos na implementação de usinas solares.

**Palavras-chave:** impacto ambiental, energia solar, desenvolvimento sustentável, energias renováveis.

### **ABSTRACT**

This study aims to deepen the understanding of the environmental dimensions of solar energy, providing valuable insights for policymakers, researchers, and stakeholders committed to the transition to a sustainable energy future. By exploring sustainability paradigms in photovoltaic energy generation, the work contributes to an intellectual and practical journey towards a more promising and ecologically conscious future, especially in the face of the critical crossroads regarding environmental impact. Through a literature review using keywords such as photovoltaic energy, sustainability, sustainable development, clean energy, environmental impact, and technological innovations, the study examines the environmental sustainability paradigms in solar energy generation in Brazil. It emphasizes solar energy as a clean and renewable source capable of significantly reducing carbon emissions and mitigating climate change. The study addresses challenges in the production of materials and industrial processes associated with solar panels, highlighting the need for sustainable approaches. It concludes that environmental paradigms reflect different perspectives on reconciling renewable sources and environmental protection, overcoming challenges such as cost, efficiency, and environmental impact. The study underscores the importance of appropriate site selection and sustainable management practices to minimize negative impacts in the implementation of solar plants.

**Keywords:** environmental impact, solar energy, sustainable development, renewable energy.

### **RESUMEN**

El objetivo de este estudio es profundizar en la comprensión de las dimensiones ambientales de la energía solar, proporcionando información importante a los responsables de la formulación de políticas, los investigadores y las partes interesadas en la transición hacia un futuro energético sostenible. Explorando los paradigmas de sostenibilidad en la generación de energía fotovoltaica, el trabajo contribuye a un viaje intelectual y práctico hacia un futuro más prometedor y ecológicamente consciente, especialmente frente a la crítica cruzada sobre el impacto ambiental. A partir de una revisión bibliográfica con palabras clave como energía fotovoltaica, sustentabilidad, desarrollo sustentable, energía limpia, impacto ambiental e innovaciones tecnológicas, el estudio examina los paradigmas de sustentabilidad ambiental en la generación de energía solar en Brasil. Destaca la energía solar como una fuente limpia y renovable que puede reducir las emisiones de carbono y mitigar el cambio climático. Aborda los desafíos en la producción de materiales y procesos industriales de paneles solares, haciendo hincapié en la necesidad de enfoques sostenibles. Se concluye que los paradigmas ambientales reflejan diferentes perspectivas para conciliar fuentes renovables y protección ambiental, superando retos



como costo, eficiencia e impacto ambiental. Destaca la importancia de elegir adecuadamente los lugares y las prácticas de gestión sostenible para reducir al mínimo los efectos negativos en la implantación de las plantas solares.

**Palabras clave:** impacto ambiental, energía solar, desarrollo sostenible, energía renovable.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, à medida que a sociedade enfrenta uma crescente demanda por energia, impulsionada pelo contínuo crescimento populacional e desenvolvimento industrial, a busca por fontes de energia sustentáveis e ambientalmente responsáveis tornou-se imperativa. Nesse contexto, a energia solar emergiu como um paradigma inovador e transformador, capaz de não apenas atender às necessidades energéticas, mas também de abordar desafios prementes relacionados às mudanças climáticas e à degradação ambiental. A geração de energia a partir do sol, por meio da tecnologia fotovoltaica, tem sido amplamente reconhecida como uma solução promissora para diversificar as matrizes energéticas, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover um futuro sustentável.

O Brasil destaca-se por exibir elevados índices de radiação solar global, quando comparado a outros países. Uma vasta extensão de seu território encontra-se em proximidade com a linha do Equador, resultando em um cenário de poucas flutuações na radiação solar ao longo do dia (HOLDERMANN et al., 2014; BARBOSA FILHO et al., 2015). Sob essa ótica, o cenário de geração de energia solar no Brasil vem experimentando uma notável expansão, impulsionada por diversos fatores. Primeiramente, o país desfruta de uma das maiores irradiações solares do mundo, especialmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, o que torna a energia solar uma opção altamente viável.

Nessa vertente, o país vem testemunhando um rápido aumento na capacidade de geração de energia solar, com a instalação de usinas solares em larga escala e projetos de geração distribuída se multiplicando em todo o território nacional. Ainda, o governo brasileiro vem implementando políticas de incentivo, como leilões de energia solar e isenções fiscais para a importação de equipamentos solares, para atrair investimentos e acelerar o desenvolvimento da indústria solar.

Apesar desse crescimento, ainda existem desafios regulatórios, incluindo questões relacionadas à conexão de sistemas de geração distribuída à rede elétrica e à compensação de



créditos de energia (não serão abordados nesse estudo). Além disso, existe uma crescente preocupação em relação aos impactos ambientais da produção de componentes solares e da expansão das usinas solares, especialmente em relação ao uso da terra e à conservação da biodiversidade.

Desta forma, torna-se extremamente importante abordar os complexos e interconectados paradigmas da sustentabilidade ambiental associados à geração de energia solar. Em um momento em que a sociedade reavalia seus compromissos com a preservação do meio ambiente, é essencial explorar as nuances e desafios inerentes à adoção em larga escala dessa fonte de energia renovável. Ao considerar os múltiplos ângulos desses paradigmas, desde as vantagens da energia limpa até as questões relacionadas à produção de materiais e ao impacto local, este estudo visa fornecer uma análise abrangente e aprofundada das complexidades que cercam a integração da energia solar em nossos sistemas energéticos.

Ao longo das próximas seções, serão examinados os principais paradigmas da sustentabilidade ambiental que moldam a geração de energia solar no Brasil, através da demonstração de como a energia solar se destaca como uma fonte limpa e renovável, capaz de reduzir significativamente as emissões de carbono e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Além disso, serão discutidos os desafios da produção de materiais e processos industriais associados aos painéis solares, bem como a necessidade de adotar abordagens sustentáveis para minimizar os impactos ambientais das etapas de implantação, operação e desativação das usinas fotovoltaicas.

Por meio dessa análise aprofundada, este estudo pretende contribuir para um entendimento mais abrangente das dimensões ambientais da energia solar, oferecendo *insights* valiosos para formuladores de políticas, pesquisadores e partes interessadas comprometidas com a transição para um futuro energético mais sustentável. À medida que enfrentamos uma encruzilhada crítica em relação ao nosso impacto ambiental, a exploração dos paradigmas da sustentabilidade na geração de energia solar destaca-se como uma jornada intelectual e prática essencial rumo a um futuro mais promissor e ecologicamente consciente.

## **2 METODOLOGIA**

A revisão bibliográfica, ou revisão de literatura, é a análise crítica, meticulosa e ampla das publicações correntes em uma determinada área do conhecimento (GIL, 2007). MARTINS;



PINTO (2001) afirmam que a pesquisa bibliográfica procura explicar e discutir um tema com base em referências teóricas publicadas em livros, revistas, periódicos e outros. Busca também, conhecer e analisar conteúdos científicos sobre determinado tema.

Pode-se acrescentar a este acervo as consultas à base de dados, periódicos e artigos indexados com o objetivo de enriquecer a pesquisa. De acordo com MARCONI; LAKATOS (2007), a revisão bibliográfica é uma forma de pesquisa que possui a finalidade de colocar o pesquisador em contato direto com tudo que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto. Dessa forma, é possível observar que a pesquisa bibliográfica proporciona o exame de um tema sob novo foco de abordagem, fazendo com que se obtenha conclusões inovadoras.

A metodologia adotada pelo presente estudo consistiu na busca por artigos científicos nas plataformas Google Acadêmico, *Web of Science*, *Scopus*, Plataforma Sucupira, Scielo, Portal de Periódicos CAPES e alguns sites do setor energético brasileiro, com foco em energias de fontes renováveis. Também se utilizou livros em plataformas online. As palavras chaves utilizadas nas buscas, de forma isolada ou combinadas, foram: energia fotovoltaica, sustentabilidade, desenvolvimento sustentável, energias limpas, impacto ambiental, alternativas energéticas, logística reversa, ciclo de vida do produto e inovações tecnológicas, nas línguas portuguesa e inglesa.

### **3 PARADIGMAS DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL**

De acordo com o Relatório Brundtland, publicado pela ONU em 1987, o modelo de desenvolvimento sustentável busca equilibrar demandas sociais, econômicas e ambientais visando à sustentabilidade dos recursos naturais e do planeta. Nesta perspectiva de desenvolvimento, as questões envolvidas ultrapassam a geração de riqueza e o foco no econômico e envolvem a preocupação com a preservação dos recursos naturais, qualidade de vida, bem-estar e equidade social (SANTOS; WEBER, 2020). Sob essa ótica, todos os empreendimentos que possuem uma política de governança baseada nos princípios da sustentabilidade devem atuar nos três pilares (ambiental, social e econômico) que visam assegurar a sobrevivência do planeta e a perpetuação dos recursos para as gerações futuras (RUGGERIO, 2021). Este estudo ficará, não exclusivamente, restrito ao pilar ambiental.

No contexto da geração de energia solar no Brasil, é possível identificar alguns paradigmas da sustentabilidade ambiental que orientam as discussões e decisões nessa área, os



quais refletem abordagens distintas para alcançar um equilíbrio entre a produção de energia a partir do sol e a preservação do meio ambiente.

O primeiro paradigma enfatiza a energia solar como uma fonte limpa e renovável de eletricidade. De acordo com SILVA; ARAUJO (2022), a captura de energia solar não envolve a emissão de poluentes atmosféricos ou gases de efeito estufa, contribuindo para a redução das emissões de carbono e minimizando os impactos negativos das mudanças climáticas. Ao investir nesse paradigma, o Brasil busca diversificar sua matriz energética, reduzir a dependência de fontes fósseis e contribuir para metas internacionais de sustentabilidade, como o Acordo de Paris.

Por sua vez, o paradigma dos impactos ambientais locais pressupõe que embora a energia solar seja considerada uma fonte de energia mais limpa em comparação com as fontes fósseis, a implementação de grandes usinas solares também pode ter impactos ambientais locais. Esse paradigma destaca a importância de avaliar cuidadosamente os locais de instalação, considerando a biodiversidade, os ecossistemas locais e as comunidades vizinhas. A conversão de terras para usinas solares pode afetar habitats naturais e ecologicamente sensíveis, levantando preocupações sobre a perda de biodiversidade e a alteração de fluxos hídricos (BARBOSA FILHO et al., 2015; ROSA et al., 2017).

Ainda, é possível identificar a existência de importantes paradigmas ambientais relacionados a produção dos materiais necessários para a construção das usinas fotovoltaicas. A fabricação dos componentes-chave, como painéis solares e sistemas de montagem, requer recursos naturais, energia e processos industriais que podem ter impactos ambientais significativos. Nessa mesma vertente é necessário considerar que a fabricação e a disposição ao final da vida útil de painéis solares e outros componentes fotovoltaicos pode gerar resíduos tóxicos e materiais descartados. O descarte inadequado desses materiais pode causar contaminação ambiental e problemas de saúde pública. O paradigma da gestão de resíduos enfatiza a importância de desenvolver tecnologias de reciclagem eficazes para painéis solares e outros componentes, a fim de minimizar os impactos ambientais negativos e promover uma economia circular (BRITO et al., 2023; SILVEIRA; URBANETZ JUNIOR, 2022; KONZEN; PEREIRA, 2020).



### 3.1 PARADIGMA DA ENERGIA LIMPA E RENOVÁVEL

As Nações Unidas propuseram 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) como um modelo para o desenvolvimento sustentável global. O Objetivo 7 aborda o desenvolvimento de fontes de energia renováveis para aumentar o acesso à energia, reduzir a utilização de combustíveis convencionais e diminuir as emissões de gases com efeito de estufa que contribuem para a deterioração do ar e problemas de saúde (ONU, 2021).

Nessa vertente, a produção e o fornecimento de energia fotovoltaica tem sido aplicado como uma solução para enfrentar o aumento da população mundial, os desafios do aquecimento global e a busca por fontes alternativas de fornecimento de energia renovável e limpa, com destacável relevância em regiões com grande disponibilidade de radiação solar (BECERRA-FERNANDEZ et al., 2023).

O crescimento exponencial da geração de eletricidade fotovoltaica, integrada ao meio ambiente (que compreende a natureza e a sociedade), é fundamental para o desenvolvimento sustentável especialmente quando considerado o papel da energia renovável na transição para uma economia mais inclusiva do ponto de vista social e eficiente na sua relação com o meio ambiente, bem como nas soluções de questões globais fundamentais como segurança energética, pobreza e mudança climática (LIMA et al., 2022).

Comparativamente às fontes de energia fóssil, as energias renováveis, como a energia fotovoltaica, possuem a vantagem de serem continuamente reabastecidas. Elas são reconhecidas por seu perfil mais ecológico e "verde", uma vez que tendem a gerar menos dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa. Isso serve como uma motivação significativa para a substituição imediata dos combustíveis fósseis por fontes de energia renovável, com o objetivo de mitigar o aquecimento global. Entretanto, o que frequentemente passa despercebido nas políticas de transição energética é a consequência não intencional que pode surgir com o aumento do uso de energias renováveis. Especial atenção deve ser dada aos seus impactos sobre outros recursos naturais no longo prazo, resultantes de sua cadeia de produção.

No caso das energias renováveis, HADIAN; MADAMI (2015) afirmam que é injustificável investir num método de produção de energia que produza um mínimo de gases do efeito estufa, mas que exija quantidades consideráveis de recursos naturais (por exemplo, água e/ou terra). Embora a utilização ativa de energias renováveis possa ser eficaz na redução das emissões de gases com efeito de estufa e na mitigação dos efeitos do aquecimento global, os



impactos secundários nos outros componentes do ecossistema, nomeadamente a água e a terra, são inevitáveis se a pegada de carbono for o único fator de decisão.

Dado que a produção de módulos fotovoltaicos é a que mais contribui para os impactos ambientais, é de responsabilidade do fabricante resolver este problema. Estes devem ser responsáveis pelos impactos durante a vida útil dos módulos fotovoltaicos, desde a fase de concepção até ao tratamento em fim de vida e devem trabalhar em conjunto com institutos de investigação para descobrir processos de produção mais eficientes em termos de materiais e com menor consumo de energia (YU; HALOG, 2015).

Além disso, quaisquer materiais tóxicos ou de risco devem ser reduzidos e até mesmo eliminados do processo de fabricação e quaisquer novos materiais ou componentes devem ser cuidadosamente testados para conhecer a sua toxicidade e segurança antes de serem utilizados. Os fabricantes devem proteger os trabalhadores e o ambiente da exposição tóxica através de sistemas de gestão rigorosos e, também, também devem monitorar as cadeias de abastecimento para garantir práticas seguras e justas (XU et al., 2018). Ainda, afirmam os autores, durante a fase de operação, espera-se que os fabricantes protejam a saúde e a segurança da comunidade, informando sobre os riscos potenciais na utilização de módulos solares. Por outro lado, durante o tratamento de fim de vida, devem estabelecer políticas eficazes de devolução de módulos solares para reciclá-los com facilidade e segurança (McDONALD; PEARCE, 2010).

Por outro lado, os governos podem desempenhar um papel crucial na redução dos impactos ambientais na produção e operação de painéis fotovoltaicos. Isso envolve estabelecer regulamentações rigorosas para garantir práticas sustentáveis, oferecer incentivos financeiros e fiscais para a adoção da energia solar limpa, promover padrões de eficiência energética para impulsionar a fabricação de painéis mais eficientes e sustentáveis, e investir em pesquisa e desenvolvimento (SHARMA et al., 2019; SHRIMALI; KNIEFEL, 2011; LEE et al., 2022; PENG et al., 2022; SMIRNOVA et al., 2021).

Além disso, governos ainda podem incentivar a reciclagem de painéis solares usados, aumentar a conscientização pública sobre os benefícios da energia solar e estabelecer parcerias com a indústria para definir metas de sustentabilidade (XU et al., 2018). Apoiar a inovação na indústria solar e apoiar empresas que desenvolvem tecnologias mais ecológicas também é essencial para a transição para uma energia solar mais sustentável. Em conjunto, essas medidas





podem contribuir significativamente para a redução dos impactos ambientais da energia solar (McDONALD; PEARCE, 2010).

Em última instância, não resta outra escolha a não ser a substituição das fontes de energia tradicionais por energias renováveis. O atual modelo global de abastecimento energético se mostra insustentável, tanto em relação à segurança energética quanto aos impactos ambientais. No entanto, é vital considerar cuidadosamente as compensações necessárias e trabalhar para minimizar os impactos secundários sobre outros recursos naturais, a fim de evitar danos irreversíveis ao ecossistema.

### 3.2 PARADIGMA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS LOCAIS

A legislação brasileira define impacto ambiental como sendo qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais (BRASIL, 1986). Ainda, essa mesma norma legal preconiza a necessidade de estudo de impacto ambiental todas as usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária, com capacidade de produção acima de 10MW, dentre outros diversos tipos de empreendimentos.

Quando se discute os impactos resultantes da energia fotovoltaica, as análises geralmente se concentram principalmente nos efeitos ambientais e econômicos, especialmente no que diz respeito à vulnerabilidade durante as fases de construção e operação das usinas solares.

O impacto ambiental negativo dos sistemas de energia solar inclui o deslocamento de terras e a possível poluição do ar e da água resultante da fabricação, das operações normais de manutenção e da demolição dos sistemas (KALOGIROU, 2004). As atividades mais impactantes envolvem a presença de maquinaria pesada, movimentação de terra e o tráfego de veículos durante a fase de construção. Enquanto na fase de operação, observam-se alterações e perda de habitats da fauna, impactos visuais intrusivos e influências na qualidade da paisagem (SILVA et al., 2019; ZARZAVILLA et al., 2022).

Em seu estudo, LIMA et al. (2022), a partir de listagem de verificação simples, onde foram catalogados 41 estudos ambientais, desenvolvidos entre 2012 e 2019, em usinas



fotovoltaicas de geração centralizada, situadas no Nordeste brasileiro, demonstraram que 82% e 76,5% dos impactos incidentes sobre os meios bióticos e abióticos, respectivamente, foram negativos. Além disso, os resultados evidenciaram que 75% desses impactos ocorreram durante a fase de implementação dos projetos e que os componentes ambientais mais impactados negativamente foram a fauna, o solo, a saúde e a segurança da população e dos trabalhadores.

Corroborando esses resultados, BARBOSA FILHO et al. (2015) afirmaram que apesar de os sistemas fotovoltaicos não emitirem poluentes durante sua operação e representarem uma promissora alternativa energética sustentável, eles apresentam impactos ambientais que requerem consideração. Destaca-se que o impacto ambiental mais significativo associado aos sistemas fotovoltaicos para geração de eletricidade ocorre durante sua fabricação e montagem. Além disso, há impactos relacionados à escolha do local de implantação.

Sob essa ótica, PEREIRA; CORIA (2022) destacaram que o uso da terra e a perda de biodiversidade são importantes aspectos a serem avaliados quando da implantação de usinas fotovoltaicas e, nessa mesma corrente, KIM et al. (2021), ao estudarem a perda projetada de habitat de sistemas fotovoltaicos de grande e médio porte no Japão e na Coreia do Sul, concluíram pela necessidade de revisar os atuais critérios de seleção de locais do implantação das usinas, já que o custo-benefício e a eficiência da produção de energia são frequentemente priorizados em detrimento da perda de habitats.

Ainda, SUURONEN et al. (2017) verificaram que a tecnologia de usinas fotovoltaicas modifica as condições microclimáticas e da biota, mas a forma e a magnitude dos efeitos dependem das condições locais e da escala da usina e que, nesse sentido, é importante considerar o nível de endemismo e a heterogeneidade dos ecossistemas.

Em outra vertente, ao avaliar os efeitos sociais decorrentes dos impactos ambientais sobre as populações tradicionais das regiões de implementação das usinas fotovoltaicas, SILVA et al. (2019) relatam que as alterações na paisagem podem refletir em obstrução de estradas de acesso às comunidades/cidades próximas durante a fase de construção; e não compensação de impactos e falta de monitoramento durante a fase operacional, dentre outros impactos sociais. Afirmam ainda os autores que os conflitos sociais poderiam reduzir potencialmente a sustentabilidade percebida da energia solar fotovoltaica, caso não sejam definidos critérios claros e rigorosos para melhor avaliar os impactos ambientais e cumulativos das centrais fotovoltaicas instaladas numa dada região.



Portanto, é crucial conduzir uma análise detalhada da área planejada para o empreendimento, a fim de implementar medidas preventivas e mitigadoras para abordar eficazmente esses impactos ambientais. Nesse sentido, torna-se imperativo estabelecer e aplicar Programas de Controle e Monitoramento Ambiental. Esses programas representam elementos essenciais de planejamento e gerenciamento ambiental, com o objetivo não apenas de minimizar possíveis degradações, mas também de compensar os impactos ambientais adversos decorrentes da instalação e operação de uma usina solar fotovoltaica.

### 3.3 PARADIGMA DA OBTENÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS E LOGÍSTICA REVERSA

Os módulos fotovoltaicos, são fabricados a partir de diversas matérias-primas. O componente central desses painéis é o silício, que pode ser do tipo monocristalino ou policristalino e é altamente purificado para ser transformado em células solares. Além do silício, os painéis solares incluem materiais condutores, geralmente de alumínio ou cobre, para coletar e direcionar a eletricidade gerada pelas células. Uma camada de vidro frontal, muitas vezes temperado, protege as células solares e é complementada por uma camada antirreflexo para aumentar a eficiência. Para proteção adicional, há uma camada de encapsulamento de polímero que resguarda as células da umidade e dos elementos. Os painéis solares são montados em uma estrutura de alumínio resistente, com uma moldura para proteger os componentes internos (KALOGIROU, 2009; VILLALVA; GAZOLI, 2012; PORTAL SOLAR, 2023). Vale destacar que, embora o silício seja predominante, pesquisas estão em andamento para desenvolver células solares de materiais alternativos, como perovskitas e materiais orgânicos, que podem oferecer vantagens em termos de custo e eficiência (COLLADOS et al., 2016).

Os painéis silício cristalino (cSi) são fabricados com silício de alta pureza, que sofrem um processo de dopagem com boro e fósforo e são transformados em células. Para formar um campo elétrico, as partes frontal e traseira são conectadas a uma pasta de prata e alumínio, impressas em formato de grade (IRENA; IEA-PVPS, 2016). Os painéis fotovoltaicos cSi tem seu peso composto por 76% de vidro, 10% de polímero, 8% de alumínio, 5% de silício, 1% de cobre e menos de 0,1% de prata e outros metais, principalmente estanho e chumbo (LUNARDI et al., 2018a).

Apesar de o silício ser abundante na Terra, encontrar a quantidade adequada na natureza com o grau de pureza necessário é desafiador. Mori et al. (2007) levantam preocupações sobre o



processo de purificação do silício, amplamente usado na fabricação de painéis solares, destacando o elevado consumo de energia, os custos significativos de instalação para unidades de purificação e a necessidade de atender a rigorosos padrões de pureza para uso em painéis solares e eletrônicos. Além disso, o processo de produção de painéis solares muitas vezes envolve a queima de carvão, liberando poluentes, como compostos orgânicos voláteis e mercúrio, na atmosfera.

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. Geralmente esses componentes são transportados pelos modais marítimo e, quando chegam ao país de aplicação, via rodoviária até os locais de consumo. Em nível global, o transporte marítimo de cargas responde por cerca de 3% das emissões globais de gases do efeito estufa, um montante comparável ao percentual de emissões do quinto maior emissor global, o Japão (YORO; DARAMOLA, 2020). No Brasil, o setor de transporte acompanha o cenário mundial. Em 2016, o setor foi responsável por 29% das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil. Desse percentual, 90% é relativo ao modal rodoviário, sendo considerado o setor que mais impacta na qualidade do ar no país (NICOLAU et al., 2020).

No outro extremo da cadeia produtiva, ao final da vida útil dos equipamentos de energia solar, como painéis solares e inversores, é altamente recomendável que os produtores e consumidores considerem a possibilidade de reutilizá-los em vez de descartá-los, uma vez que o descarte contribui para o aumento dos impactos ambientais. Quando o descarte se torna inevitável, é crucial obter informações sobre o método mais apropriado, considerando as regulamentações locais e as opções disponíveis, garantindo assim a segurança pública e a preservação do meio ambiente. Vale ressaltar que certos resíduos, como materiais radioativos, não possuem métodos seguros de descarte devido à sua natureza contaminante. O descarte adequado de painéis solares após o fim de sua vida útil é essencial, e diversas alternativas estão disponíveis, como tratá-los como lixo eletrônico, incinerá-los, reutilizar componentes, reciclá-los ou enviá-los para aterros (GRANATA et al., 2014). A escolha da melhor opção depende de vários fatores, como a distância entre o local de uso e o de descarte, a infraestrutura local disponível para essas atividades, os custos associados, a complexidade técnica necessária para a



reciclagem de cada componente e a existência de mercados para a reutilização de produtos usados (LUNARDI, et al., 2018b).

O descarte ou reciclagem do resíduo sólido resultante precisa ser pensado com sagacidade e abordagem adequada. O Brasil ainda está a margem quando o assunto é a reciclagem das placas fotovoltaicas. Atualmente, o processo demonstra eficácia limitada, concentrando-se principalmente na reutilização dos materiais semicondutores (PEDROSO, 2023). Para prevenir a transformação de uma solução energética em um desafio ambiental, torna-se imperativo implementar medidas de tratamento voltadas à reciclagem desses resíduos de modo que se promova a recuperação de matérias-primas essenciais, a redução dos custos de produção e a minimização dos impactos que os componentes dos módulos solares possam acarretar ao meio ambiente e à saúde humana, caso sejam descartados de forma inadequada (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

## **4 ALTERNATIVAS E INOVAÇÕES SUSTENTÁVEIS**

### **4.1 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A PRODUÇÃO DE PAINÉIS SOLARES**

A busca por materiais alternativos ao tradicional silício na confecção de painéis fotovoltaicos tem se destacado como um campo de pesquisa em constante evolução no setor de energia solar, visando aprimorar a eficiência, reduzir custos e expandir as aplicações da energia solar. Além do silício, materiais como células de perovskitas, orgânicas, telureto de cádmio (CdTe), silício amorfo e seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) estão ganhando destaque. Cada um desses materiais apresenta características específicas que os tornam adequados para diferentes cenários e requisitos.

Sob essa ótica, as células solares de perovskitas (PSCs) têm recebido atenção devido a sua alta eficiência potencial e custo de produção relativamente baixo. Elas podem ser mais flexíveis e leves quando comparadas as células de silício, mas ainda enfrentam desafios relacionados a estabilidade a longo prazo. Suas variadas propriedades e sua diversificação quanto aos inúmeros elementos que podem fazer parte da sua estrutura permitem com que sejam utilizadas em diversos dispositivos. As PSCs apresentaram um rápido avanço e aumento da PCE (valor de eficiência de conversão - PCE, do inglês *Power Conversion Efficiency*) em um curto espaço de tempo, comparadas com qualquer outro tipo de tecnologia solar, e hoje têm eficiência semelhante às células solares de silício (RAPHAEL et al., 2018).



Os maiores empecilhos enfrentados pelas PSCs estão relacionados à estabilidade e toxicidade do material. As PSCs são vulneráveis à umidade e à presença de oxigênio, exposição à luz UV, processo de produção em solução e temperatura, o que resulta em dificuldades de fabricação, prejudicando, assim, as propriedades de transporte de carga e, conseqüentemente, a eficiência do dispositivo (LIU et al., 2015). Perovskitas baseadas em haletos de chumbos são as mais utilizadas na formação do filme das células solares, porém têm resultado em um impacto negativo sobre o meio ambiente, devido à toxicidade do Pb. Dessa forma, seu uso em equipamentos eletrônicos pode ser restrito, dependendo do país e de suas leis nacionais, prejudicando, assim, sua aplicação comercial (PETROVIC et al., 2015). A substituição do Pb pelo Sn tem sido estudada, porém, estas perovskitas ainda apresentam instabilidade, sendo um desafio a ser contornado nos próximos anos. (LIU et al., 2015; PETROVIC et al., 2015).

A célula solar orgânica de película fina (TFOSC, do inglês *Thin Film Organic Photovoltaic Cell*) é altamente considerada como uma alternativa de baixo custo à contraparte convencional baseada em moléculas inorgânicas para conversão de energia solar. As propriedades químicas ajustáveis das moléculas orgânicas, flexibilidade mecânica, leveza e possível semitransparência são algumas das características fascinantes da TFOSC (OSENÍ; MOLA, 2017). As TFOSCs são células solares em que a camada ativa fotovoltaica consiste em semicondutores à base de carbono (DEIBEL; DYAKONOV, 2010).

As suas principais vantagens são, em particular, que os semicondutores orgânicos podem ser adaptados à finalidade, baseiam-se em matérias-primas abundantes e não tóxicas, e as tecnologias de fabrico utilizadas, principalmente revestimento a vácuo e processamento de soluções, são, em princípio, capazes de revestir grandes áreas de forma barata e rápida (ABBEL et al., 2018; QU; FORREST, 2018) Isso, combinado com o baixo consumo de material (cerca de 1 g de semicondutor orgânico por m<sup>2</sup>), o processamento em baixa temperatura e a compatibilidade com substratos flexíveis permitem dispositivos leves e uma grande versatilidade em aplicativos. A principal diferença na operação entre células solares de silício e as TFOSCs, e a razão pela qual os TFOSCs ficam atrás do silício solar em sua comercialização, é que a absorção de luz em filmes finos de semicondutores orgânicos ainda não leva à geração eficiente, sendo este o grande desafio de seu desenvolvimento (RIEDE et al., 2020).

Os painéis fotovoltaicos de telureto de cádmio (CdTe) utilizam este composto químico como material semicondutor. O CdTe é um material barato e abundante, o que torna os painéis



fotovoltaicos de CdTe uma opção atraente para aplicações de grande escala, como usinas solares. Os painéis fotovoltaicos de CdTe têm eficiências de conversão de energia de até 22%, o que é comparável à eficiência dos painéis solares de silício cristalino. Eles também são relativamente leves e flexíveis, o que os torna adequados para aplicações em telhados e outros locais onde o espaço é limitado. A principal restrição a sua utilização é, justamente, a presença do cádmio que é um metal pesado tóxico, pode apresentar problemas de degradação a longo prazo (KAPADNIS et al., 2020).

Os painéis fotovoltaicos de silício amorfo (a-Si) são mais baratos e fáceis de produzir do que os painéis fotovoltaicos de seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS), mas têm eficiência de conversão de energia mais baixa. Os painéis fotovoltaicos de CIGS têm eficiência de conversão de energia mais alta, mas são mais caros e difíceis de produzir (MAKRIDES et al., 2010; POLMAN et al., 2016). Ainda assim, possuem como características comuns o uso de recursos naturais, a geração de resíduos ao longo de seu ciclo de vida e a dificuldade de reciclagem, ou seja, ainda apresentam grandes desafios específicos de desenvolvimento (AL HANAI et al., 2011).

#### 4.2 ALTERNATIVAS LOCACIONAIS PARA A IMPLANTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS

O Brasil se comprometeu a restaurar e regenerar naturalmente 12 milhões de hectares de áreas degradadas até 2030 (SAFAR et al., 2020). Muitas dessas áreas não têm potencial econômico para outros usos, o que representa um passivo ambiental e econômico. No Brasil, a recuperação de áreas degradadas geralmente envolve a identificação de uma nova aplicação produtiva para elas. Essa aplicação pode ser similar ou diferente da anterior (RODRIGUES et al., 2009). Em outra vertente, a transição para fontes de energia limpa e renovável é uma prioridade global devido às mudanças climáticas e à crescente demanda por energia e as usinas fotovoltaicas são uma solução promissora para essas áreas degradadas, pois exigem pouco espaço e contribuem para a sustentabilidade energética (FOLSTER et al., 2013; RAMPINELLI; GOMES, 2013).

A recuperação de áreas degradadas é uma preocupação global, e no Brasil é regulamentada por leis ambientais (BRASIL, 1981). Essas leis visam minimizar os impactos negativos causados por atividades humanas como, por exemplo, a mineração e aterros à céu



aberto do país, os quais, após o encerramento, necessitarão de uma destinação útil à sociedade (PEREIRA et al., 2020). De acordo com BARBOSA FILHO et al. (2015), ao mesmo tempo, como o cenário energético brasileiro está passando por transformações, com a crescente importância das fontes de energia renovável e a matriz energética do país está se diversificando, a energia solar tem se destacado, apresentando um crescimento notável nos últimos anos.

A convergência entre a recuperação de áreas degradadas e a expansão da geração solar é uma oportunidade para alinhar objetivos ambientais, energéticos e financeiros. A implementação de usinas fotovoltaicas em áreas degradadas pode não apenas contribuir para a matriz energética, mas também servir como uso futuro para revitalizar esses territórios (SZABÓ et al., 2017).

Em outra vertente, existe a possibilidade de instalação de usinas solares fotovoltaicas em áreas de baixa biodiversidade, como regiões áridas ou pastagens, como uma prática que visa minimizar o impacto sobre a biodiversidade local. Essas áreas muitas vezes apresentam uma menor diversidade de espécies em comparação com ecossistemas mais complexos, como florestas tropicais. Ao escolher locais com baixa biodiversidade, os impactos diretos sobre ecossistemas sensíveis e espécies ameaçadas são reduzidos. A instalação em áreas áridas, por exemplo, pode aproveitar terrenos que possuem pouca aptidão para a agricultura ou uso habitacional, proporcionando uma utilização mais eficiente dessas áreas (SANTANGELI et al., 2016).

Por fim, outra opção não menos interessante é a instalação de usinas solares fotovoltaicas em áreas com alta disponibilidade de radiação solar é estratégica e fundamental para otimizar a eficiência e reduzir o impacto ambiental dessas instalações. A radiação solar é a fonte primária de energia para a geração de eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos (CRESESB, 2008). Portanto, selecionar locais com elevada exposição solar direta permite a maximização da produção de energia.

Ao instalar em regiões com altos níveis de radiação solar, as usinas conseguem gerar mais eletricidade com menor quantidade de painéis, o que significa uma eficiência energética aprimorada. Isso resulta em uma pegada ambiental menor, pois a necessidade de ocupação de terra é reduzida em comparação com instalações menos eficientes (MAKRIDES ET AL., 2010). Além disso, a escolha de áreas com alta disponibilidade de radiação solar muitas vezes está associada a regiões áridas ou semiáridas, onde a competição por uso da terra é menor (SANTANGELI et al., 2016). Isso minimiza o impacto sobre ecossistemas sensíveis, como





florestas ou habitats com elevada biodiversidade, contribuindo para uma implantação mais sustentável das usinas solares.

## 5 CONCLUSÕES

Os paradigmas ambientais representam as diferentes perspectivas que moldam as discussões em torno da sustentabilidade ambiental na geração de energia solar no Brasil. A abordagem adotada dependerá de como a sociedade e os tomadores de decisão equilibram a busca por fontes limpas e renováveis de energia com a proteção ambiental e os impactos sociais.

Os principais desafios para a utilização de novas tecnologias fotovoltaicas são o custo, a eficiência, a disponibilidade de materiais, o impacto ambiental e a integração à rede elétrica. As pesquisas e o desenvolvimento nessa área estão avançando rapidamente, e é provável que esses desafios sejam superados nos próximos anos.

Algumas iniciativas que estão sendo tomadas para superar esses desafios incluem a redução dos custos de produção, o aumento da eficiência de conversão de energia, o desenvolvimento de novos materiais, a redução do impacto ambiental e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia.

No entanto, é fundamental destacar que a implementação de usinas solares requer cuidados ambientais. A seleção adequada do local, avaliações de impacto ambiental e práticas de gestão sustentável são essenciais para garantir que a instalação e operação das usinas minimizem qualquer impacto negativo sobre o meio ambiente.

Isso inclui avaliações ambientais, considerações sobre o uso da água, práticas de gestão eficiente e monitoramento contínuo como elementos cruciais para assegurar a implementação e a operação responsáveis e sustentáveis, promovendo o equilíbrio entre a expansão da capacidade de geração de energia solar e a preservação dos ecossistemas e comunidades locais.



## REFERÊNCIAS

ABBEL, R.; GALAGAN, Y.; GROEN, P. Roll-to-roll fabrication of solution processed electronics. **Advanced Engineering Materials**, v. 20, n. 8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201701190>

AL HANAI, T.; HASHIM, R.B.; EL CHAAR, L.; LAMONT, L.A. Environmental effects on a grid connected 900 W photovoltaic thin-film amorphous silicon system. **Renewable Energy**, v. 36, n. 10, p. 2615-2622, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.010>

BARBOSA FILHO, W.P.; FERREIRA, W.R.; AZEVEDO, A.C.S.; COSTA, A.L.; PINHEIRO, R.B. Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 628-642, 2015. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v4e02015628-642>.

BECERRA-FERNANDEZ, M; SARMIENTO, A.T.; CARDENAS, L.M. Sustainability assessment of the solar energy supply chain in Colombia. **Energy**, n. 282, 128735, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128735>.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União - 31/08/1981.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986**. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, Diário Oficial da União - 17/02/1986.

BRITO, J.L.R.; SANTOS, M.R.; SHIBAO, F.Y. Gestão e valorização de resíduos de sistemas de geração de energia fotovoltaica. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 9, p. 16062-16083, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV3N9-136>.

COLLADOS, M.V; CHEMISANA, D; ATENCIA, J. Holographic solar energy systems: The role of optical elements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 130-140, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.260>

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia solar: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2008. 28 p. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf). Acesso em 12 Set 2023.

DEIBEL, C.; DYAKONOV, V. Polymer-fullerene bulk heterojunction solar cells. **Reports on Progress in Physics**, v. 73, n. 9, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/73/9/096401>

FOLSTER, A.L.A.; BRASIL JUNIOR, A.C.P.; SHAYANI, R.A. Potencial de geração de energia solar fotovoltaica em lixões e aterros no Brasil. 2020. Disponível em: <https://institutoventuri.org/ojs/index.php/FIRS/article/view/76/50>. Acesso em 15 Set 2023.



GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GRANATA, G.; PARGANELLI, F.; MOSCARDINI, E.; HAVILIK, T.; TORO, L. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 123, p. 239-248, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012>

HADIAN, S.; MADAMI, K. A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? **Ecological Indicators**, v. 52, p. 194-206, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.029>.

HOLDERMANN, C.; KISSEL, J.; BEIGEL, J. Distributed photovoltaic generation in Brazil: an economic viability analysis of small-scale photovoltaic systems in the residential and commercial sectors. **Energy Policy**, v. 67, p. 612-617. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.064>.

IRENA and IEA-PVPS. International Renewable Energy Agency and International Agency Photovoltaic Power Systems. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. Abu Dhabi: IRENA, 2016.

KALOGIROU, S.A. Environmental benefits of domestic solar energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 3075-3092, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.12.019>.

KALOGIROU, S.A. **Solar Energy Engineering**. 1ª Ed. London: Elsevier, 2009.

KAPADNIS, R.S.; BANSODE, S.B.; SUPEKAR, A.T.; BHUJIBAL, P.K.; KALE, S.S.; JADKAR, S.R.; PATHAM, H.M. Cadmium telluride/cadmium sulfide thin films solar cells: a review. **ES Energy & Environment**, v. 10, p. 3-12, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.30919/eseec8c706>

KIM, J.Y.; KOIDE, D.; ISHIHAMA, F.; KADOYA, T.; NISHIHIRO, J. Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats. **Science of the Total Environment**, v. 779, p. 1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146475>.

KONZEN, B.A.D.; PEREIRA, A.F. **Gestão de resíduo fotovoltaico: revisão bibliográfica sobre o cenário de fim de vida do sistema**. 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1011>. Acesso em 12 Set 2023.

LEE, C.C.; HUSSAIN, J.; CHEN, Y. The optimal behavior of renewable energy resources and government's energy consumption subsidy design from the perspective of green technology implementation. **Renewable Energy**, n. 195, p. 670-680, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.070>.

LIMA, P.D.T.D.; NETO, M.M.; ABRAHÃO, R. Análise dos processos de avaliação de impacto ambiental em usinas fotovoltaicas no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 03, p. 1260-1273, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1260-1273>.



LIU, X.; ZHAO, W.; CUI, H.; XIE, Y.; WANG, Y.; XU, T.; HUANG, F. Organic-inorganic halide perovskite based solar cells - revolutionary progress in photovoltaics. **Inorganic Chemistry Frontiers**, v. 2., p. 315-335. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1039/c4qi00163j>

LUNARDI, M. M.; ALVAREZGAITAN, J. P.; BILBAO, J. I.; CORKISH, R. **A review of recycling processes for photovoltaic modules**. In: ZAIDI, B. (Ed.). *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. London: IntechOpen, 2018a.

LUNARDI, M. M., ALVAREZ-GAITAN, J. P., BILBAO, J. I., CORKISH, R. Comparative life cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules. **Applied Sciences**, v. 8, n. 8, 1396. 2018b. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8081396>

MAKRIDES, G.; ZINSSER, B.; NORTON, M.; GEORGHIOU, G.E.; SCHUBERT, M.; WERNER, J.H. Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 754-762, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.021>

MARCONI, M.A; LAKATOS, E.M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas. Amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados.** 6ªed. São Paulo: Atlas, 2007.

MARTINS, G.A; PINTO, R.L. **Manual para elaboração de trabalhos acadêmicos.** São Paulo: Atlas, 2001.

McDONALD, N.C.; PEARCE, J.M. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. **Energy Policy**, v. 38, n. 11, p. 7041-7047, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.023>.

MORI, V.; SANTOS, R.L.C.; SOBRAL, L.G.S. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. (Série Tecnologia Ambiental, 41).  
NICOLAU, O.N.B.; CHAVES, G.L.D.; ZANCHETTA, I.T. Avaliação do consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil (2016-2026). **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 54, p. 205-226, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v54i0.62606>

ONU - Organização das Nações Unidas. **Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável.** 2021. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>. Acesso em 28 Ago 2023.

OSENI, S.O.; MOLA, G.T. Properties of functional layers in inverted thin film organic solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 160, p. 241-256, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.036>

PEDROSO, R.N.S.; SANTOS, L.R.; PIRES, R.C.S. **Um futuro problema com o descarte de painéis solares.** In: PIRES, R.C.S.; FARIA, B.M.; ARAÚJO, D.S.; SILVA, F.; NASCIMENTO, J.O.; SILVA, L.S.; SANTOS, L.R. (Orgs.). *Construção civil [livro eletrônico]: engenharia e inovação (Vol. 5)*. Rio de Janeiro: Epiteya, 2023, p. 204-213. DOI: <https://doi.org/10.47879/ed.ep.2023724p204>

PENG, W.; LU, S.; LU, W. Green financing for the establishment of renewable resources under carbon emission regulation. **Renewable Energy**, n. 199, p. 1210-1225, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.140>

PEREIRA, G.N.; SHAYANI, R.A.; BRASIL JUNIOR, A. Análise de viabilidade técnica e econômica para instalação de usina solar fotovoltaica nos cinco principais aterros do Brasil. 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/996>. Acesso em 15 Set 2023.

PEREIRA, M.C.R.; CORIA, A.S. Impactos ambientales de sistemas de energía solar fotovoltaica: una revisión de análisis de ciclo de vida y otros estudios. **Revista EIA**, v. 19, n. 38, p. 1-18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1570>

PETROVIC, M.; CHELLAPPAN, V.; RAMAKRISHNA, S. Perovskites: solar cells & engineering applications—materials and device developments. **Solar Energy**, v. 122, p. 678-699, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.09.041>

POLMAN, A.; KNIGHT, M.; GARNETT, E.C.; EHRLER, B.; SINKE, W.C. Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. **Science**, v. 352, n. 6283, p. aad4424, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>

PORTAL SOLAR. **Como funciona a energia solar**. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-energia-solar.html>. Acesso em 02 Set 2023.

QU, B.; FORREST, S.R. Continuous roll-to-roll fabrication of organic photovoltaic cells via interconnected high-vacuum and low-pressure organic vapor phase deposition systems. **Applied Physics Letters**, v. 113, n.5, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5039701>

RAMPINELLI, G.A.; GOMES, J.C.Q. Projeto de Implantação de Sistemas Fotovoltaicos em Áreas Degradadas e Recuperadas Ambientalmente. **RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 15, n. 2, p. 291-305, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5935/RECEN.2013.02.08>

RAPHAEL, E.; SILVA, M.N.; SZOSTAK, R.; SCHIAVON, M.A.; NOGUEIRA, A.F. Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente. **Química Nova**, v. 41, n. 1, p. 61-74, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170127>

RIEDE, M.; SPOLTORE, D.; LEO, K. Organic solar cells - the path to commercial success. **Advanced Energy Materials**, v. 1, n.1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.202002653>

RODRIGUES, R.R.; LIMA, R.A.F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A.G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1242-1251, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.12.008>

ROSA, A.R.O.; BOZIKI, D.M.; JARDIM, R.P.; CAMPELLO, R.P. Os incentivos e os impactos ambientais da energia solar no Brasil. 2017. Disponível em: <https://eventoscientificos.ifsc.edu.br/index.php/sictsul/sictsul2016/paper/viewPaper/1826>. Acesso em 13 Set 2023.

RUGGERIO, C.A. Sustainability and sustainable development: A review of principles and definitions. **Science of the Total Environment**, n.786, 147481. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481>.

SAFAR, N.V.H.; MAGNAGO, L.F.S.; SCHAEFER, C.E.G.R. Resilience of lowland Atlantic forests in a highly fragmented landscape: Insights on the temporal scale of landscape restoration. **Forest Ecology and Management**, v. 470, p. 118183, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118183>

SANTANGELI, A.; TOIVONEN, T.; POUZOLS, F. M.; POGSON, M.; HASTINGS, A.; SMITH, P.; MOILANEN, A. Global change synergies and trade-offs between renewable energy and biodiversity. **Gcb Bioenergy**, v. 8, n. 5, p. 941-951, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12299>

SANTOS, G.F.; WEBER, A.L. Desenvolvimento sustentável e responsabilidade social empresarial: Uma análise entre a teoria e a prática. **Desenvolvimento em Questão**, n. 51, p. 247-267, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2020.51.247-267>.

SILVA, G.D.P.; MAGRINI, A.; TOLMASQUIM, M.T.; BRANCO, D.A.C. Environmental licensing and energy policy regulating utility-scale solar photovoltaic installations in Brazil: status and future perspectives. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 37, n. 6, p. 503-515, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/14615517.2019.1595933>.

SILVA, H.M.F.; ARAUJO, F.J.C. Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação-REASE**, v. 8, n. 3, P. 859-869, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4654>.

SHARMA, A.; PANDEY, S., KOLHE, M. Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, v. 8, n. 5, p. 597-610, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12720/sgce.8.5.597-610>.

SHRIMALI, G.; KNIEFEL, J. Are government policies effective in promoting deployment of renewable electricity resources? **Energy Policy**, v. 39, p. 4726-4741, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.055>.

SILVEIRA, N.S.; URBANETZ JUNIOR, J. Cadeia de valor na reciclagem de módulos fotovoltaicos. 2022. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1058>. Acesso em 14 Set 2023.

SMIRNOVA, E.; KOT, S.; KOLPAK, E.; SHESTAK, V. Governmental support and renewable energy production: A cross-country review. **Energy**, n. 230, 120903, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120903>.

SUURONEN, A.; MUÑOZ-ESCOBAR, C.; LENSU, A.; et al. the influence of solar power plants on microclimatic conditions and the biotic community in chilean desert environments. **Environmental Management**, v. p. 60, 630–642, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0906-4>.



SZABÓ, S.; BÓDIS, K.; KOUGIAS, I.; MONER-GIRONA, M.; JAGER-WALDAU, A.; BARTON, G.; SZABÓ, L. A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1291-1300, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.117>

VILLALVA, M.G; GAZOLI, J.R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

ZARZAVILLA, M., QUINTERO, A., ABELLÁN, M. A., SERRANO, F. L., AUSTIN, M. C., TEJEDOR-FLORES, N., Comparison of environmental impact assessment methods in the assembly and operation of photovoltaic power plants: A systematic review in the Castilla - La Mancha Region. **Energies**, v. 15, n. 5, p. 1-25, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15051926>.  
XU, Y.; LI, J.; TAN, Q.; **Waste Management** PETERS, A.L.; YANG, C. Global status of recycling waste solar panels: A review., v. 75, p. 450-458, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>

YORO, K.O.; DARAMOLA, M.O. **CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect**. In.: RAHIMPOUR, M.R.; FARSI, M.; MAKAREM, M. (Eds.). *Advances in Carbon Capture*. London: Woodhead Publishing, 2020, p. 3-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>

YU, M.; HALOG, A. Solar photovoltaic development in Australia - a life cycle sustainability assessment study. **Sustainability**, v. 7, p. 1213-1247, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7021213>.