

A máxima de que “a energia fotovoltaica é limpa” é verdadeira?



Nicole Neuwald*



Gunther Damaceno
Barbosa**



Celio Bermann***

*Advogada, mestranda em Energia pela UFABC.

**Físico, mestre em Energia pela UFABC e doutorando em Nanociências e Materiais Avançados pela UFABC.

***Professor Associado 3 do Instituto de Energia e Ambiente da USP, Doutor em Eng. Mecânica pela FEM-UNICAMP, Mestre em Eng. de Produção pela COPPE-UFRJ e Arquiteto Urbanista de formação pela FAU-USP. É docente credenciado nos Programas de Pós-Graduação em Energia (PPGE) e em Ciência Ambiental (PROCAM) da USP.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Energia Limpa, Ciclo de Vida, Sustentabilidade, Impacto Ambiental.

Resumo: A energia solar fotovoltaica (FV) é amplamente reconhecida como fonte “limpa” por sua operação livre de emissões. Este estudo questiona sua “limpeza” ao analisar o ciclo de vida completo, abordando impactos da extração intensiva de materiais, fabricação, geração com intermitência, custos e descarte, que geram desafios ambientais e sociais. Conclui-se que a energia fotovoltaica, por mais que seja “limpa” durante sua operação, possui desafios ao longo de sua cadeia de valor que a impedem de ser considerada “100% limpa”, sendo necessária a mitigação dos impactos aqui indicados.

A energia solar FV é frequentemente amplamente vendida como uma solução energética “limpa”. Ela converte diretamente a luz solar em eletricidade de forma estática e não poluente, representando um recurso inesgotável e universal. A produção e instalação do sistema demanda consumo relevante de materiais e energia, o que causa impactos ambientais – e é por isso que o questionamento se a energia seria efetivamente “limpa” é pertinente. No entanto, a discussão sobre a verdadeira “limpeza” da energia solar vai além de sua operação, exigindo uma análise aprofundada de todo o seu ciclo de vida – da extração da matéria-prima ao descarte...

Convém antes destacarmos as diferenças entre energia “limpa” e energia renovável. Energia “limpa” é aquela que não tem nenhum impacto ambiental e esse tipo de energia não existe, já que todas as etapas do ciclo de vida geram algum tipo de impacto. Já a energia renovável é aquela que se reabastece naturalmente, exemplo: sol, chuva, vento, maré, etc.

Durante a fase operacional, a energia solar FV é incontestavelmente uma fonte de energia de baixo carbono e ambientalmente amigável: não há produção de poluição, resíduos adicionais ou gases de efeito estufa (GEE),

conferindo-lhe uma pegada de carbono rasa. Os parques solares contribuem positivamente para as mudanças climáticas ao não gerarem emissões nocivas. Seus impactos negativos localizados são considerados substancialmente menores em comparação com os efeitos desproporcionais da queima de combustíveis fósseis.

Apesar de sua operação exemplar, as ressalvas à “limpeza total” da energia solar FV surgem na análise dos impactos “antes e depois” da geração de eletricidade.

É imprescindível que seja avaliado o ciclo completo, desde a extração da matéria-prima ao consumo final e descarte, para avaliar o impacto na saúde e no meio ambiente – e isso se dá por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV), uma ferramenta que investiga e avalia os impactos ambientais de um produto ou sistema, desde a extração da matéria-prima até o descarte final.

Desafios do Ciclo de Vida da Solar Fotovoltaica

Intensidade de Materiais e Mineração

Um painel fotovoltaico é composto por alumínio (do minério bauxita), vidro (de areia e minerais) e, principalmente, por silício cristalino (do quartzo ultrapuro), como pode ser visto no esquema das camadas do módulo FV indicado na figura 1.

Embora os módulos FV tenham melhorado a sua eficiência e potência ao longo do tempo, a sua produção demanda grande quantidade de energia e/ou mineração para serem produzidos – por exemplo, alumínio, silício e cobre (para a rede elétrica) – o que implicaria na necessidade de mineração massiva para escalar a produção dos materiais essenciais, já que sua exploração, por se tratar de minério de baixo teor, gera mais resíduos que os combustíveis fósseis.

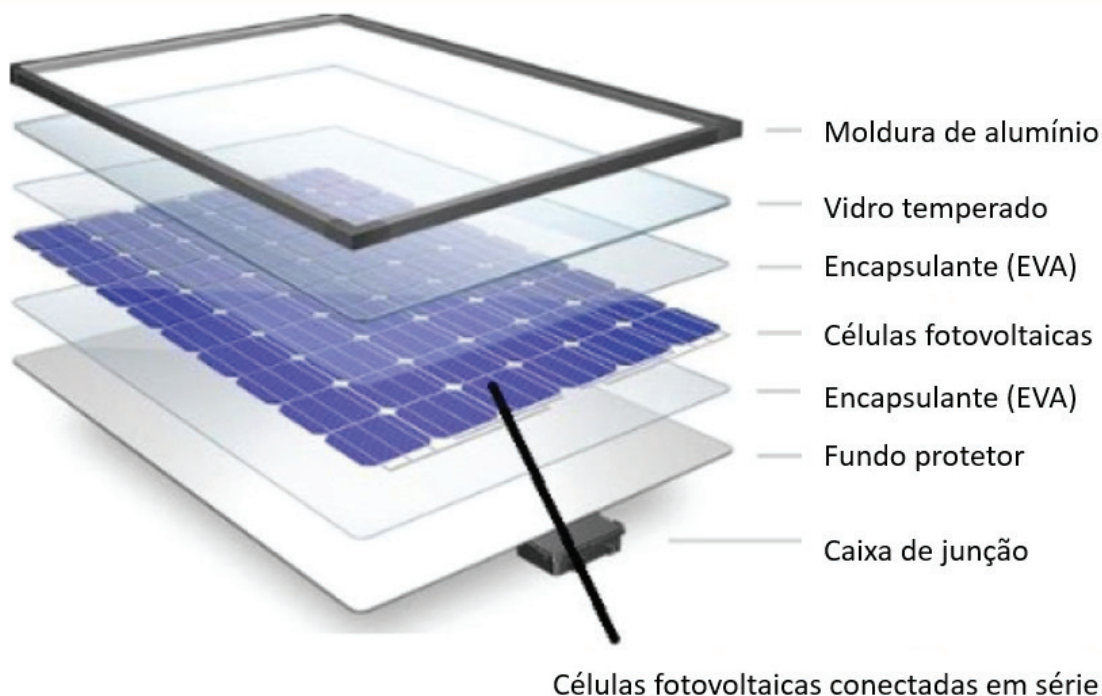


Figura 1. Adaptação de Campos (2019), demonstrando as camadas que compõem o painel fotovoltaico.

Porcentagem dos componentes de um módulo fotovoltaico (%)

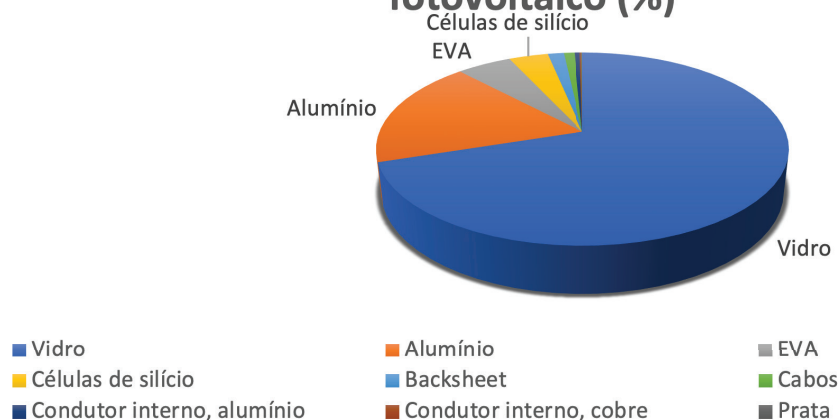


Figura 2. Composição percentual dos componentes de um módulo fotovoltaico adaptada de Campos (2019).

Fabricação e Emissões

A etapa de fabricação dos componentes é a que mais consome energia e materiais, conforme gráfico da figura 2, na qual é indicada a proporção dos componentes que compõem o módulo FV.

A produção de polissilício, lingotes e wafers de silício consome a maior parte da energia, necessitando de calor em altas temperaturas. Atualmente, considerando a localização das fábricas, mais de 60% da eletricidade usada na fabricação global de energia solar FV é gerada a partir do carvão.

As emissões de GEE na geração FV ocorrem principalmente na etapa de transformação do silício, montagem do painel e logística. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), os painéis solares precisam operar, em média, de 4 a 8 meses para compensar suas emissões relativas à fabricação, um período significativamente menor que sua vida útil média de 25 a 30 anos. Houve uma redução de 45% nas emissões de fabricação desde 2011, graças a melhorias no processo e à mudança para eletricidade de baixo carbono.

No entanto, persiste a poluição na etapa da logística (transporte de insumos e produtos) e mão de obra – e estas também devem ser levadas em consideração.

Intermitência, Custos e Integração à Rede

Os principais desafios da energia solar FV são inerentes à sua natureza e tornam a sua utilização um desafio: a irradiação solar intermitente (embora o índice de irradiação no Brasil seja alto), sendo necessária a combinação de outra fonte de energia juntamente com a energia FV ou então o uso de baterias, o que faz com que o custo de geração e armazenamento atual seja muito elevado, sem mencionar o impacto ambiental ao se considerar o “complemento” necessário para o fornecimento de energia confiável e contínuo quando do uso da energia solar FV.

A transição energética pode resultar em custos de energia mais altos no curto e médio prazo devido à necessidade de novas infraestruturas.

Descarte e Fim de Vida

Conforme mencionado, os painéis FV têm uma vida útil estimada em 25 a 30 anos. Após esse período, ou em caso de danos, são descartados. Embora existam componentes recicláveis, há uma escassez de dados completos sobre o descarte de sistemas FV no Brasil, dada a relativa novidade da tecnologia no país. A adoção de peças recicladas na fabricação e manutenção pode ajudar a reduzir ainda mais os impactos.

Considerações Finais

É fundamental estabelecer a diferença entre “energia limpa” e “energia renovável”, compreendendo que energia renovável não é sinônimo de energia totalmente “limpa”.

Os impactos negativos da localização e operação de tecnologias de energia “limpa” são significativamente menores se comparados com os combustíveis fósseis. Porém devem ser analisados os impactos de fabricação, transporte e instalação, que geram impactos ambientais e sociais ao longo de sua cadeia de valor.

A energia solar fotovoltaica de fato é “limpa” quando considerada a sua operação de forma isolada. Porém, para que seja tida como completamente sustentável é essencial que os impactos do ciclo de vida sejam mitigados e gerenciados de forma eficaz. Logo, a energia solar, como um sistema complexo, exige um equilíbrio cuidadoso entre desempenho, custo e confiabilidade.

Portanto, considerando os desafios e os materiais utilizados para produção dos painéis FV, pode-se dizer que atingir “100% de energia limpa” não é possível com a tecnologia e custos atuais.

Mesmo com avanços tecnológicos que possam otimizar o uso desses materiais ou encontrar substitutos, a transição para uma energia com redução dos impactos ambientais ainda implicará em uma intensa necessidade de recursos físicos, o que pode resultar em desafios ambientais e econômicos, como a degradação ambiental devido à mineração ou a volatilidade dos preços devido à escassez de materiais.

Em suma, embora a energia solar fotovoltaica não possa ser chamada de “limpa” devido aos impactos em seu ciclo de vida (especialmente na fabricação e descarte), ela é, sem dúvida, uma solução essencial para um avanço na transição energética global e a sustentabilidade ambiental.

Conforme o Prof. Célio Bermann, em suas aulas ministradas no IEE-USP, a única energia verdadeiramente limpa é aquela que não precisa ser consumida. Portanto, o sucesso da adoção global da energia solar FV dependerá da superação contínua das barreiras técnicas, econômicas e sociais indicadas neste estudo.

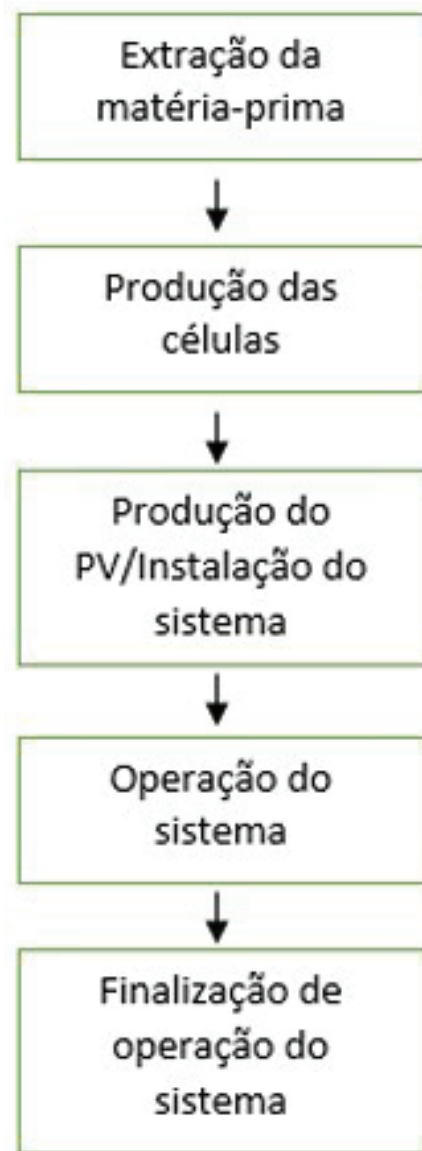


Figura 3. Diagrama com fases do ciclo de vida (Coelho, 2023).

Referências

CAMPOS, Juan Pablo Romero. **Análisis ciclo vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos**. 2019. 215 f. (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico) – Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2019. Disponível em <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174091>>. Acesso em: 29 de jun. 2025.

COELHO, Lorena Maria Morais Fernandes. **Estudo da Análise do Ciclo de Vida aplicado a usinas solares fotovoltaicas: uma abordagem no contexto da usina da UFRN**. 2023. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

DINCER, Ibrahim; ACAR, Canan. A review on clean energy solutions for better sustainability. **International Journal of Energy Research**, v. 39, p. 585-606, mar. 2015. DOI: 10.1002/er.3329.

HONORATO, Thainan. População ainda confunde energia renovável com energia limpa. **Jornal da USP**, São Paulo, 26 set. 2018. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/populacao-ainda-confunde-energia-renovavel-com-energia-limpa/>. Acesso em: 12 de mai. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Special Report on Solar PV Global Supply Chains**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d2ee601d-6b1a-4cd2-a0e8-db02dc64332c/SpecialReportonSolarPVGlobalSupplyChains.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

