



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Tiago de Almeida Santos

Trabalho de Conclusão de Curso

Campina Grande, PB
07 de outubro de 2024

Tiago de Almeida Santos

Impactos Ambientais Qualitativos Gerados por Painéis
Fotovoltaicos: da Manufatura ao Descarte

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à coordenação do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como pré-requisito para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica.

Orientador:
Pablo Bezerra Vilar, D. Sc.

Campina Grande, PB
07 de outubro de 2024

Tiago de Almeida Santos

Impactos Ambientais Qualitativos Gerados por Painéis
Fotovoltaicos: da Manufatura ao Descarte.

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à coordenação do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como pré-requisito para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica.

Aprovado em ____/____/____

Roberto Silva de Siqueira. D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Pablo Bezerra Vilar, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer a Deus por guiar meus passos e iluminar meu caminho ao longo deste processo. Sua graça e misericórdia foram a força motriz por trás de cada desafio superado e de cada conquista alcançada.

À minha família, meu pai Adão, minha mãe Edilma, meus irmãos Alan, Aécio e Maria Isabel (in memoriam), meu porto seguro, meu alicerce inabalável, não há palavras suficientes para expressar minha gratidão por seu apoio incansável. Seu amor incondicional e encorajamento constante foram a âncora que me manteve firme durante os momentos difíceis.

À Andressa, minha noiva, você foi minha rocha, minha inspiração e minha fonte de apoio inabalável ao longo deste período. Sua presença e seu encorajamento constante tornaram cada desafio mais leve e cada vitória mais doce. Seu amor ilumina meu caminho e me dá forças para perseguir meus sonhos.

Aos meus colegas de Universidade e da vida, que de alguma forma dividiram comigo esse processo de formação e que de alguma forma contribuíram para essa realização.

Por fim, Agradeço aos meus professores, em especial ao professor Professor Pablo Bezerra Vilar, que me orientou nesse trabalho, e a todos os outros que formam o corpo docente da Universidade Federal de Campina Grande pelo ensino de qualidade.

*No mundo tereis aflições,
mas tende bom animo
eu venci o mundo.
João 16:33.*

Resumo

A produção de painéis solares fotovoltaicos gera impactos ambientais significativos ao longo de todo o ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas, como o silício e metais (cobre, prata e alumínio), até o descarte final. Esses processos envolvem altos níveis de consumo energético, uso de produtos químicos perigosos e emissões de gases de efeito estufa, além de contribuir para a poluição do solo, ar e água. A reciclagem de painéis solares ao final de sua vida útil tem sido considerada uma solução promissora, permitindo a recuperação de materiais valiosos e reduzindo a necessidade de novas extrações. No entanto, ainda há desafios tecnológicos e econômicos relacionados à viabilidade e eficiência desse processo. Estudos recentes destacam a importância de melhorar a eficiência de fabricação e desenvolver novas tecnologias menos agressivas ao meio ambiente, além de utilizar fontes de energia renovável no processo de produção, para minimizar os impactos ambientais associados à fabricação de painéis solares.

Palavras-chave: painéis fotovoltaicos. impacto ambiental. silício. extração de metais. sustentabilidade.

Abstract

The production of photovoltaic solar panels generates significant environmental impacts throughout their entire life cycle, from the extraction of raw materials such as silicon and metals (copper, silver, and aluminum) to their final disposal. These processes involve high energy consumption, the use of hazardous chemicals, and greenhouse gas emissions, in addition to contributing to soil, air, and water pollution. Solar panel recycling at the end of their useful life has been considered a promising solution, allowing the recovery of valuable materials and reducing the need for new extractions. However, technological and economic challenges still exist regarding the feasibility and efficiency of this process. Recent studies emphasize the importance of improving manufacturing efficiency, developing less environmentally harmful technologies, and using renewable energy sources in the production process to minimize the environmental impacts associated with solar panel manufacturing.

Keywords: photovoltaic panels. environmental impact. silicon. metal extraction. sustainability.

Lista de Figuras

1	Partes de um módulo fotovoltaico.	15
2	Funcionamento de uma célula fotovoltaica.	16
3	Célula Monocristalina.	17
4	Célula policristalina.	18
5	Célula de silício amorfo.	18
6	Representação de um Sistema Ligado à Rede.	20
7	Sistemas <i>off grid</i>	20
8	Representação de um sistema híbrido.	21
9	Emissões e aquecimento esperado até 2100	22
10	Representação de um sistema híbrido.	24
11	Emissão de GEE devido a análise de ACV	25
12	Forno a arco elétrico.	28

Lista de Tabelas

- 1 Principais impurezas do SiGM com destaque para os teores de boro e fósforo. 29

Lista de Siglas e Abreviaturas

- GEE** Gases do Efeito Estufa
- EVA** Etil Vinil Acetato
- CA** Corrente Alternada
- CC** Corrente Contínua
- CRESESB** Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sálvio Brito
- PROCEL** Programa Nacional de Conservação da Energia Elétrica
- IPCC** *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- ONU** Organização das Nações Unidas
- ECO-92** Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente
- MDL** Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- BEN** Balanço Energético Nacional
- EPE** Empresa de Pesquisa Energética
- CNPE** Conselho Nacional de Política Energética
- ANEEL** Agência Nacional de Energia Elétrica
- ACV** Análise do Ciclo de Vida
- EPE** Empresa de Pesquisa Energética
- SiGS** Silício em Grau Solar
- SiGM** Silício Grau Metalúrgico
- UHEs** Usinas Hidrelétricas

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos	12
1.3	Estrutura do Trabalho	13
2	Fundamentação Teórica	14
2.1	Energia Solar Fotovoltaica	14
2.2	A célula Fotovoltaica	14
2.2.1	Tipos de células Fotovoltaicas	17
2.3	Sistema Fotovoltaico	19
2.3.1	Sistemas Conectados à Rede (<i>On Grid</i>)	19
2.3.2	Sistemas <i>Off Grid</i>	20
2.3.3	Sistemas Híbridos	20
2.4	Energia e Meio Ambiente	21
3	Energia no Brasil	23
3.1	Matriz Energética Brasileira	24
3.2	Extração da Matéria Prima	26
3.2.1	Produção de silício em Grau Solar	27
3.2.2	Processos de Purificação	29
3.2.3	A Extração do Cobre	30
3.2.4	A Extração da Prata	31
3.2.5	A Extração do Alumínio	31
3.2.6	Impacto Energético e Emissões de GEE	32
3.2.7	Mitigação dos Impactos Ambientais e Alternativas Sustentáveis	32
3.2.8	Alternativas de Mitigação desses Impactos	33
4	Considerações Finais	35

1 Introdução

A jornada da geração de energia elétrica ao longo do tempo é marcada por uma notável evolução, impulsionada pela inovação e pela busca por fontes mais eficientes e sustentáveis. Desde os primeiros experimentos com eletricidade até os sistemas avançados de hoje, a maneira como geramos essa forma de energia passou por diversas transformações.

No início, a geração de energia elétrica era muitas vezes baseada em métodos rudimentares, como a fricção de objetos para criar carga estática. No entanto, as descobertas científicas e tecnológicas começaram a ter uma maior evolução a partir do século XIX quando o inglês Michael Faraday inventou um sistema capaz de produzir energia elétrica a partir de energia mecânica. Até então, as únicas fontes de energia elétrica eram as pilhas e baterias, que transformavam energia química em eletricidade. Esses geradores iniciais abriram caminho para a produção de eletricidade em larga escala.

Com a Revolução Industrial, a demanda por energia elétrica cresceu exponencialmente, impulsionando o aprimoramento das tecnologias de geração. O uso de máquinas a vapor e, posteriormente, de turbinas a vapor possibilitou a criação de usinas elétricas mais eficientes. No entanto, muitas dessas primeiras fontes de energia tinham impactos ambientais significativos, como a queima de carvão, que resultava em poluição atmosférica e problemas de saúde pública.

O século XX trouxe avanços fundamentais na geração de energia elétrica, com a descoberta e o desenvolvimento de alternativas mais limpas. A energia hidrelétrica emergiu como uma fonte importante, aproveitando o potencial energético da água em movimento para gerar eletricidade. Além disso, a descoberta da energia nuclear trouxe consigo promessas de geração abundante, mas também desafios associados à segurança e ao gerenciamento de resíduos radioativos.

À medida que a consciência ambiental cresceu, houve um aumento na adoção de fontes de energia renovável, como a solar e a eólica. Essas tecnologias, baseadas no sol e no vento, respectivamente, proporcionaram formas mais sustentáveis de gerar eletricidade, minimizando os impactos negativos no meio ambiente. Paralelamente, as tecnologias de armazenamento de energia evoluíram, permitindo uma integração mais eficiente de fontes intermitentes, como a solar e a eólica, à rede elétrica.

No contexto energético do Brasil, a diversidade de escolhas para geração e consumo de energia elétrica se destaca. No âmbito das fontes não renováveis, que dependem de recursos limitados, como o gás natural, derivados do petróleo e carvão mineral, existe uma presença marcante. Simultaneamente, as fontes renováveis estão ganhando projeção global, fornecendo uma energia limpa por meio de avanços tecnológicos. Destacam-se as energias do sol e do vento.

Contudo, é essencial abordar as preocupações ambientais ligadas ao ciclo de vida das placas fotovoltaicas. O processo completo, desde a extração dos materiais até o descarte, pode resultar em impactos significativos no meio ambiente. A fabricação dos componentes das placas, bem como sua instalação e manutenção, pode levar a emissões de gases de efeito estufa, uso excessivo de recursos naturais e produção de resíduos.

Embora a tecnologia fotovoltaica ofereça vantagens como uma fonte de energia limpa durante sua operação, também suscita preocupações relacionadas ao impacto ambiental global. Durante a produção das placas, a utilização de produtos químicos prejudiciais

e quantidades substanciais de energia pode contribuir para a poluição e a escassez de recursos. Além disso, o descarte inadequado de painéis solares no fim de sua vida útil pode gerar resíduos perigosos.

Nesse contexto, torna-se fundamental considerar não apenas a expansão da energia solar fotovoltaica como parte da transição para fontes mais sustentáveis, mas também a preocupação em minimizar os danos ambientais associados a todas as fases do ciclo de vida das placas. Assim, podemos avançar em direção a um futuro onde a energia elétrica seja não apenas abundante, mas também cada vez mais limpa e consciente dos desafios ambientais.

1.1 Justificativa

Nesse cenário de evolução da geração de energia elétrica, surgiu uma preocupação cada vez mais pertinente: compreender e diminuir os danos ambientais associados a todo o ciclo de vida dos sistemas de geração de energia elétrica. Esse enfoque tem levado a importantes estudos dos impactos causados não apenas durante a fabricação, mas também na fase de descarte dos equipamentos.

Um exemplo fundamental dessa análise mais profunda é a investigação dos danos ambientais causados pelo processo de fabricação das placas fotovoltaicas.

Embora as células fotovoltaicas desempenhem um papel crucial na transição para uma matriz energética mais sustentável, sua produção pode envolver substâncias químicas tóxicas e requer grandes quantidades de energia. A extração e o processamento dos materiais utilizados, como silício e metais, podem gerar resíduos poluentes e impactar negativamente ecossistemas locais.

Além disso, os danos ambientais causados pelas placas fotovoltaicas não se limitam à sua produção. É importante considerar o ciclo completo de vida, incluindo o descarte após o fim da vida útil. Placas solares fora de uso podem conter materiais potencialmente perigosos, como chumbo e cádmio, que podem vazar para o meio ambiente se não forem tratados adequadamente. O manejo inadequado de painéis solares descartados pode contribuir para a contaminação do solo e da água.

Nesse cenário, o estudo e a conscientização sobre os danos ambientais causados pelas placas fotovoltaicas estão se tornando cada vez mais importantes. À medida que a tecnologia fotovoltaica continua a desempenhar um papel fundamental na transição para uma matriz energética mais limpa, é imprescindível que nos dediquemos a entender e mitigar os impactos ambientais associados. A pesquisa, a inovação e o compromisso com práticas sustentáveis são essenciais para garantir que a geração de energia solar seja não apenas eficaz em termos energéticos, mas também benéfica para o meio ambiente em todas as fases do ciclo de vida.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é realizar uma análise abrangente dos impactos ambientais associados à fabricação e ao descarte de painéis fotovoltaicos. Serão examinados os diversos aspectos envolvidos nesse ciclo de vida, desde a produção inicial até o eventual descarte dos painéis. O intuito é compreender o panorama completo dos danos ambientais decorrentes da utilização em larga escala dessa tecnologia de geração de energia solar.

1.3 Estrutura do Trabalho

Inicialmente, o capítulo 1 destina-se à descrição das considerações iniciais, da motivação principal, bem como, dos objetivos e da organização do trabalho com o intuito de sistematizar os assuntos abordados no trabalho. No capítulo 2, será discutido os conceitos e fundamentos necessários para entender a geração fotovoltaica, os tipos de células fotovoltaicas, os equipamentos e normas associadas a este tipo de tecnologia. No capítulo 3, será feito uma revisão abrangente da literatura existente sobre os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das placas fotovoltaicas. Explorando estudos recentes que abordam a fabricação, o uso e o descarte dessas placas, destacando os impactos ambientais associados a cada fase do ciclo de vida. No capítulo 4, serão apresentadas as conclusões derivadas da análise realizada. Sintetizando os principais pontos discutidos no trabalho e destacando os principais resultados, descobertas e consequências relacionados aos impactos ambientais das placas fotovoltaicas. Além disso, será discutido implicações práticas, recomendações e possíveis direções futuras de pesquisa no campo.

2 Fundamentação Teórica

Nesse capítulo será abordada a fundamentação teórica acerca da energia fotovoltaica, dando ênfase à sua história, os tipos de células fotovoltaicas, assim como seus componentes e tipos de sistemas.

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

O processo de criação e desenvolvimento dos primeiros instrumentos capazes de transformar energia proveniente do sol em energia elétrica foi de forma gradativa e fragmentada nas mãos de importantes pesquisadores.

A energia elétrica é obtida da conversão direta da luz por meio do efeito fotovoltaico. Esse efeito, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz (CRESESB, 2014)

Atualmente, a energia solar que utilizamos teve início em 1954 com Russell Shoemaker Ohl, inventor da primeira placa de silício, e como forma de criação, patenteou o sistema fotovoltaico que conhecemos da modernidade. De certa forma, seu sucesso foi graças a Cavin Fuller, Gerald Pearson e Gerald Chapin, cientistas do laboratório Bell Labs (SANTO, 2021).

Fuller foi o químico que desenvolveu, pela primeira vez, o processo de dopagem do silício. Pearson, então, estabilizou as placas de silício a partir de reações químicas produzidas pelo contato de uma junção P-N ou diodo com as placas mergulhadas em lítio, podendo observar um comportamento fotovoltaico nas placas analisadas. Em paralelo, Chapin procurava uma fonte de energia alternativa para as baterias usadas em redes telefônicas remotas. Fuller e Pearson entraram em contato com o físico e, em 1955, células de silício foram usadas pela primeira vez como fonte de alimentação de uma rede telefônica na Geórgia, um estado dos Estados Unidos (PORTAL SOLAR, 2024).

Com isso, não demorou muito para as células fotovoltaicas serem produzidas comercialmente, ocorreu logo no ano seguinte, em 1956, iniciou-se a produção industrial (CRESESB, 2014).

2.2 A célula Fotovoltaica

Os painéis solares são elementos essenciais à geração de energia fotovoltaica, sendo constituídos por células fotovoltaicas que desempenham um papel crucial nesse processo. Estas células são produzidas a partir de semicondutores, predominantemente silício, capazes de absorver a luz solar e convertê-la em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. (PORTAL SOLAR, 2023)

Além de sua capacidade de absorção de energia solar, os painéis solares possuem a capacidade de gerar eletricidade em duas camadas opostas, resultando em um aproveitamento eficiente da luz solar. A estrutura de uma célula fotovoltaica é essencialmente um "sanduíche" composto por duas fatias de material semicondutor, geralmente silício. Durante o processo de fabricação, o silício é dopado com impurezas, como fósforo e boro, para criar camadas com cargas elétricas distintas. (PORTAL SOLAR, 2023)

O principal componente do sistema é a célula fotovoltaica, porém o aproveitamento em escala comercial deste tipo de energia se faz com o auxílio de outros elementos, que segundo Tolmasquim (2016) são:

- **Moldura:** parte externa estruturante do módulo, geralmente de alumínio. É através dela que é feita a fixação do módulo.
- **Selante:** composto adesivo usado para unir as camadas internas do módulo como moldura. Deve impedir a entrada de gases e umidade, além de proteger o interior de vibrações e choques mecânicos.
- **Vidro:** camada rígida externa que protege as células e condutores do ambiente, ao mesmo tempo em que permite a entrada de luz para ser convertida em eletricidade. É um vidro especial, com baixo teor de ferro, com uma camada anti reflexiva, e com superfície texturizada, que evitam a reflexão da luz que atinge o vidro.
- **Encapsulante:** filme que envolve as células, protegendo-as da umidade e dos materiais externos, além de otimizar a condução elétrica. O encapsulante mais utilizado é o EVA (*Etil Vinil Acetato*).
- **Células Fotovoltaicas:** componente eletrônico responsável pela conversão direta da energia eletromagnética em energia elétrica.
- **Backsheet:** parte inferior do módulo que previne a entrada de umidade e protege as células de elementos externos. Além disso, oferece isolamento elétrico adicional.

Representados na Figura 1.

Figura 1: Partes de um módulo fotovoltaico.

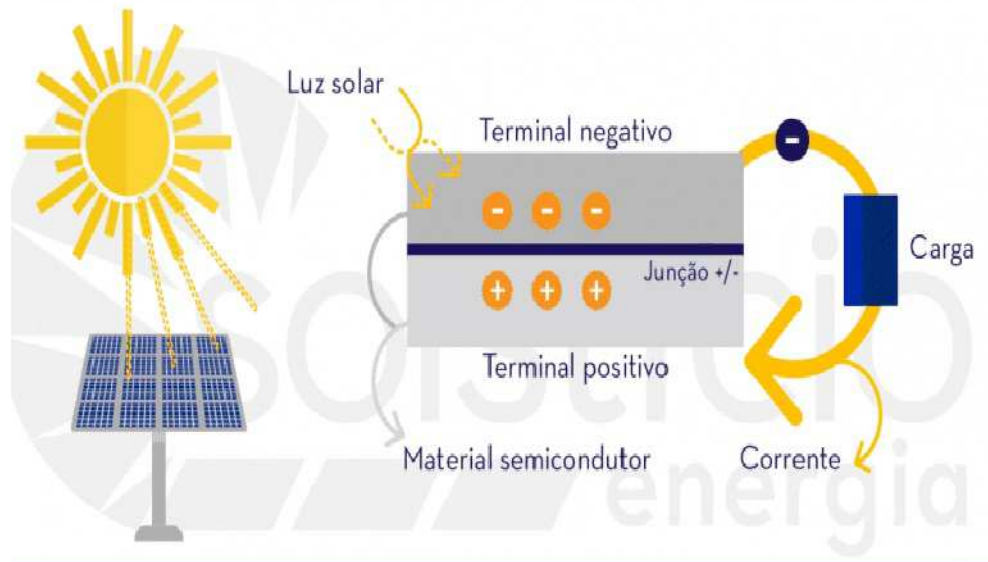


Fonte: Blue Sol (2023).

O efeito fotovoltaico ocorre em nível atômico ao incidir um fóton na ligação entre dois átomos induzindo ao seu rompimento. Para alcançar esta ruptura na ligação com pouca energia é preciso que o átomo seja instável (banda de valência incompleta) e que o número de elétrons nele contidos seja diferente de oito. Os materiais que possuem esta característica em seus átomos são os semicondutores, como o Silício utilizado na construção das células fotovoltaicas, que possui quatro elétrons em sua camada de valência. A corrente produzida pelo movimento dos elétrons em um semicondutor puro é insignificante, devido ao baixo valor de portadores livres. Dessa maneira, são adicionadas impurezas ao material para aumentar os portadores livres; o novo material obtido é chamado de semicondutor extrínseco (GESELLSCHAFT, 2008).

A representação do funcionamento de uma célula fotovoltaica é demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Solstício Energia (2023).

A dopagem do material puro transforma eles em semicondutores do tipo N ou do tipo P, conforme as características desejadas. Os materiais semicondutores do tipo N são obtidos com um maior número de elétrons livres enquanto materiais do tipo P com um maior número de cargas positivas ou lacunas, variando de acordo com a impureza introduzida no material semicondutor. Se o material tipo N é anexado a um material do tipo P, ambos tornam-se eletricamente neutros formando-se, na área de contato, um campo elétrico que tende a equilibrar os elétrons livres movendo-os do material tipo N para o do tipo P. No momento que a luz incide sobre o material, os fótons chocam-se com outros elétrons fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores, gerando assim um campo elétrico em que os elétrons são orientados e o movimento de elétrons pelo material tipo N (positivo) e o material de tipo P (negativo) gera uma diferença de potencial separada pela zona de conjuntura chamada barreira de potencial (GESELLSCHAFT, 2008).

Essa complexa interação de materiais e processos dentro de um painel solar destaca não apenas sua eficácia na geração de energia limpa e renovável, mas também seu potencial para impulsionar a transição energética rumo a um futuro mais sustentável.

A energia solar fotovoltaica apresenta diversas vantagens, entre elas, destacam-se: resistência a condições climáticas extremas, pouca manutenção, gera energia mesmo em dias nublados, não utiliza combustível, tem durabilidade superior a 25 anos, não produz nenhum tipo de poluição, seja ambiental ou sonora. No entanto, apresenta algumas desvantagens como: custo de investimento inicial elevado, necessita de tecnologia sofisticada e depende de outros fatores como temperatura, radiação e quantidade de nuvens (BRAGA, 2008).

2.2.1 Tipos de células Fotovoltaicas

Diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos e as células fotovoltaicas fabricadas a partir de lâminas de silício (monocristalinos e policristalinos) dominam o mercado atual ultimamente. Tal tecnologia já representava cerca de 81% em 2010 da produção mundial desde 2000, e em 2011 a marca já era de 87% (HERING, 2012).

- Célula Monocristalina

As células monocristalinas pertencem à primeira geração de células fotovoltaicas e são produzidas a partir de um cristal extremamente puro, o que se torna mais eficiente, no entanto, as mais caras. Têm um rendimento relativamente alto por volta de 16%, podendo atingir 23% em laboratório (SOUZA, 2016). Um exemplo de uma célula monocristalina é encontrado na Figura 3.

Figura 3: Célula Monocristalina.



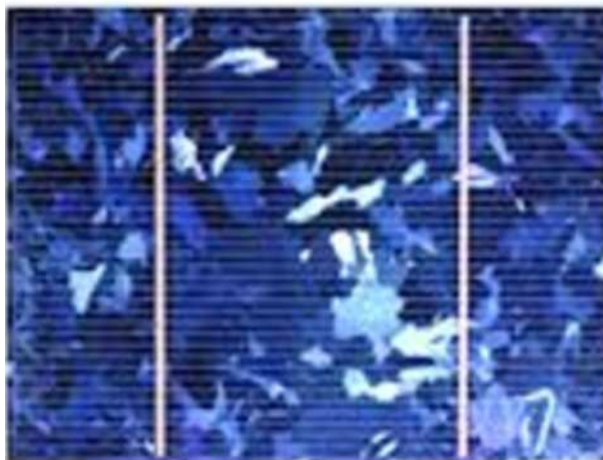
Fonte: Carneiro (2020).

As células fotovoltaicas à base de silício monocristalino têm a desvantagem de apresentar alto custo de produção, devido às quantidades de materiais utilizados e a energia envolvida na sua fabricação (CRESESB/CEPEL, 2008).

- Célula Policristalina

As células de silício policristalino são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de porções de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício resfria lentamente e solidifica-se. Nesse processo, os átomos não se organizam em um único cristal, formando assim uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é de aproximadamente 13% (NIEDZIALKOSKI, 2013). Um exemplo de uma célula policristalina é encontrado na Figura 4.

Figura 4: Célula policristalina.



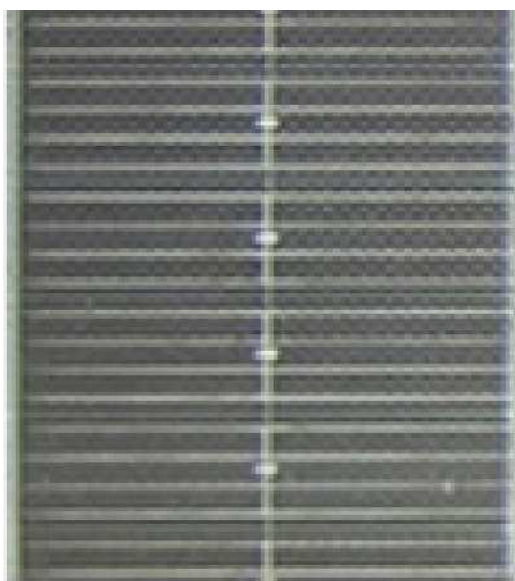
Fonte: Delta volt (2010).

Para a produção das células policristalinas, a quantidade de material utilizado é praticamente a mesma utilizada na produção de células monocristalinas, porém, a energia necessária para produzi-las é significativamente reduzida (CRESESB/CEPEL, 2008).

- Células de Silício Amorfo

As células de silício amorfo são obtidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%. Os principais obstáculos para a adoção dos filmes finos estão relacionados ao nível de confiabilidade quando comparados com células cristalinas (NIEDZIALKOSKI, 2013). Um exemplo de uma célula de silício amorfo é encontrado na Figura 5.

Figura 5: Célula de silício amorfo.



Fonte: Energia solar (2012).

No caso do silício amorfo, esses obstáculos estão relacionados principalmente com a estabilidade do material. No entanto, esse efeito tem sido reduzido adotando-se células de múltiplas camadas. Um enorme progresso tem sido feito em anos recentes no número de materiais fotovoltaicos e intervenções, em termos de eficiência de conversão, eficiências na faixa de 18 a 24% têm sido alcançadas na tradicional base de silício fabricado com ambos os materiais, mono e policristalino. (CRESESB/CEPEL, 2008).

A célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil. (CRESESB/CEPEL, 2008).

2.3 Sistema Fotovoltaico

Conforme destacado por Câmara (2011), um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede. Cada uma dessas categorias apresenta uma configuração básica que inclui uma unidade de controle de potência e uma unidade de armazenamento, elementos essenciais para o funcionamento eficaz do sistema.

2.3.1 Sistemas Conectados à Rede (*On Grid*)

Os sistemas *On Grid* são sistemas que se conectam à rede elétrica de distribuição. Este tipo de sistema representa a maior taxa de expansão nas aplicações dos sistemas elétricos. Os painéis que convertem a energia solar em eletricidade são conectados em sequências, formando o conjunto fotovoltaico. Esse conjunto é conectado a inversores que, por meio de processos elétricos, convertem a corrente contínua em corrente alternada. Dessa forma, os inversores transferem o excesso de energia gerada para a rede elétrica de distribuição (RAMPINELLI, 2010).

Um sistema fotovoltaico interligado à rede é ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Representação de um Sistema Ligado à Rede.

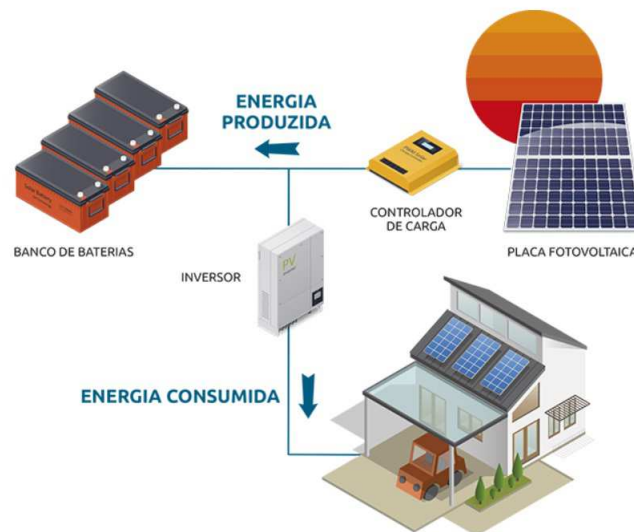


Fonte: Bortoloto (2017).

2.3.2 Sistemas *Off Grid*

Os sistemas off grid geram eletricidade durante o dia, e simultaneamente à sua produção, essa energia pode ser consumida ou armazenada em baterias para atender às demandas quando a geração de eletricidade for reduzida. Tais instalações autônomas precisam ser planejadas de maneira apropriada para satisfazer as exigências do cliente, otimizando, assim, o sistema fotovoltaico (DALMARCO, 2017). A Figura 7 ilustra um exemplo de um sistema *off grid*

Figura 7: Sistemas *off grid*.



Fonte: Eco Aquecedores (2024).

2.3.3 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são comumente empregados em conjunto com outras fontes de energia renovável, como a eólica, geotérmica, biomassa e solar, formando o sistema híbrido. É essencial manter um controle completo sobre essas fontes de energia para tirar o máximo proveito da alta eficiência do sistema. Por conseguinte, esses sistemas são considerados mais equilibrados e estáveis.

Embora os sistemas de geração tenham alguma capacidade de armazenamento, é crucial ter um meio de produção de energia, que pode ser convencional, para servir

como reserva. Os sistemas híbridos conseguem fornecer energia a um sistema isolado com um nível de confiabilidade comparável às redes convencionais (PEREIRA, 2010).

Um esquema de um sistema híbrido composto pelas principais fontes, eólica, gerador a diesel e solar, é ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Representação de um sistema híbrido.



Fonte: Tecnoveritas (2018).

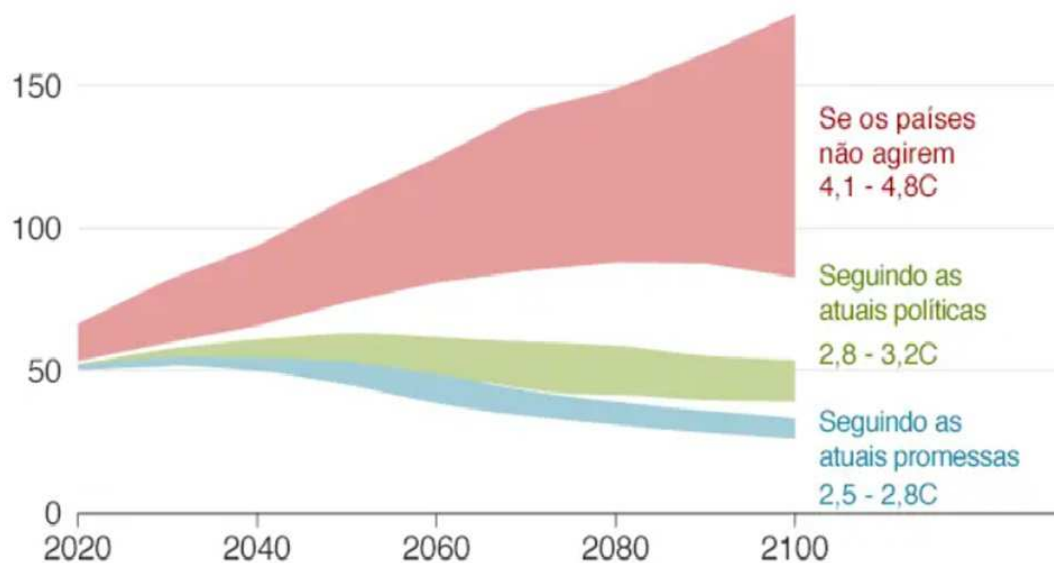
2.4 Energia e Meio Ambiente

Nas últimas décadas, a discussão sobre energia limpa e renovável ganhou destaque. Esse tema se tornou crucial à medida que questões ambientais passaram a ser tratadas com maior urgência, devido ao avançado estágio de degradação do planeta, que já atingiu um nível preocupante e, em muitos casos, irreversível. O novo relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indica que as emissões nocivas de carbono de 2010-2019 foram as mais altas na história da humanidade, com aumentos de emissões registrados “em todos os principais setores do mundo”. (nações unidas brasil)

Para o secretário-geral da ONU, António Guterres, esta é prova de que o mundo está em um caminho rápido para o desastre, que pode tornar o planeta inabitável. “Isso não é ficção ou exagero. É o que a ciência nos diz que resultará de nossas atuais políticas energéticas. Estamos no caminho para o aquecimento global de mais que o dobro do limite de 1,5 grau Celsius que foi acordado em Paris em 2015”, ressaltou. (nações unidas brasil)

As emissões e aquecimento esperado até 2100 podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9: Emissões e aquecimento esperado até 2100



*As emissões estão em gigatoneladas de CO2 equivalente

Fonte: BBC (2020).

Alguns tratados internacionais são firmados continuamente, mas pouco se é feito de forma prática e efetiva. O chamado Acordo de Kyoto, fechado durante a 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada em Kyoto, Japão, em 1997. Foi o primeiro tratado internacional para controle da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Entre as metas, o protocolo estabelecia a redução de 5,2%, em relação a 1990, na emissão de poluentes, principalmente por parte dos países industrializados. Uma delas determinava a redução de 5,2%, em relação a 1990, da emissão de gases do efeito estufa, no período compreendido entre 2008 a 2012. O protocolo também estimulava a criação de formas de desenvolvimento sustentável para preservar o meio ambiente. (SENADO)

O Protocolo de Kyoto foi assinado por 84 países. Porém, os Estados Unidos, um dos países que mais emitem gases poluentes no mundo, abandonaram o Protocolo em 2001 com a justificativa de que cumprir as metas estabelecidas comprometeria seu desenvolvimento econômico. (SENADO)

Outro processo fracassado na tentativa de conter a emissão dos GEE foi a criação do mercado de carbono, criado na convenção quadro das Nações Unidas sobre mudança climática, durante a ECO-92. Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono (CO2) não emitida corresponde a um crédito de carbono. Este crédito pode ser negociado no mercado internacional ele recebe uma certificação emitida pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), ou seja, recebe os créditos que estarão disponíveis para serem comercializados com os países que não alcançaram suas metas. A redução da emissão de outros gases, igualmente geradores do efeito estufa, também pode ser convertida em créditos de carbono, utilizando-se o conceito de carbono equivalente. (IPAM AMAZONIA)

O mercado de créditos de carbono é desvantajoso por ser uma forma para con-

tinuar poluindo. O argumento é que grandes organizações e países podem adquirir créditos, mas sem intensificar as estratégias para a redução das emissões. Países que compram créditos de carbono podem aumentar a emissão de gases ao invés de diminuir, pois basta comprar créditos para compensar isso. Os países em desenvolvimento não contam com os recursos e tecnologias para promover a redução da emissão de gases. Além disso, podem não ter condições financeiras para adquirir créditos de carbono de outros países. (SEBRAE)

3 Energia no Brasil

Nos últimos 10 anos, o Brasil tem feito uma significativa transformação na matriz energética, conforme revelado pelo Balanço Energético Nacional (BEN) 2024, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME). Os dados demonstram uma queda na participação de petróleo e derivados, que passou de 39,2% para 35,1%, e do gás natural, de 13,5% para 9,6% no período. A mudança aponta os avanços do país na diversificação e sustentabilidade da oferta energética nacional. (BEN, 2024)

Segundo o ministro de Minas e Energia, Alexandre Silveira, a redução na dependência de fontes fósseis reflete o nosso esforço contínuo para fortalecer a renovação do setor energético nacional. Nos últimos anos, nossas políticas públicas e investimentos estratégicos têm impulsionado o crescimento de fontes alternativas, como energia solar, eólica e biomassa. Essa transição contribui significativamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. (GEE)

Com vasto potencial natural, o Brasil se posiciona como líder emergente na transição energética global, como aponta relatório do Fórum Econômico Mundial divulgado em 2024. À medida em que o país reafirma o compromisso com a inovação e a sustentabilidade, a redução na dependência de petróleo e gás natural pode ser um catalisador para um futuro energético mais limpo e seguro para todos os brasileiros. (BEN, 2024)

Além da preocupação ambiental, no âmbito energético, existe a necessidade da criação e pesquisa de meios alternativos de geração de energia. Uma alternativa apontada pelo Governo Federal foi a criação do programa Combustível do Futuro, que prioriza o uso de fontes alternativas de energia e o fortalecimento do desenvolvimento tecnológico nacional, que foi formalizada recentemente por meio de uma resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). O programa é voltado para o planejamento de médio e longo prazo do setor de biocombustíveis. Segundo o Ministério de Minas e Energia, com o Combustível do Futuro, o Brasil dá mais um passo na liderança da transição energética mundial. (SIB, 2021)

Segundo o Ministro de Minas e Energia, Bento Albuquerque o Combustível do Futuro proporcionará o aumento na utilização de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono, incentivando o desenvolvimento de tecnologia veicular nacional com biocombustíveis, tornando a nossa matriz de transporte mais limpa e sustentável. (SIB, 2021)

Entre os objetivos do programa, segundo o ministro, estão a integração das políticas públicas relacionadas ao setor automotivo e de combustíveis e a avaliação

da eficiência energética ambiental. (SIB, 2021)

3.1 Matriz Energética Brasileira

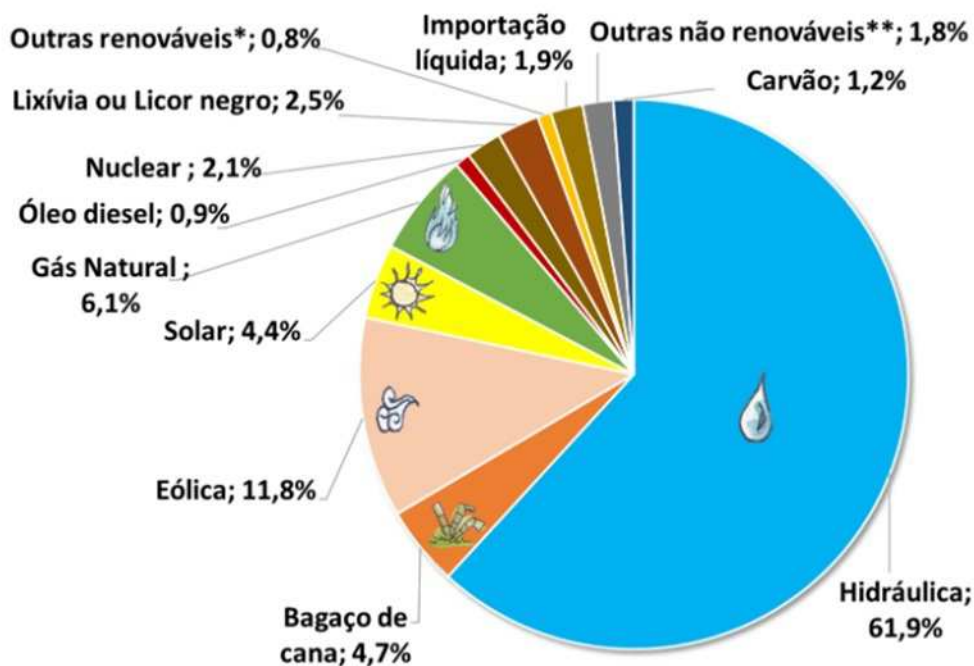
De acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), atualmente as três maiores fontes renováveis que compõem a matriz de energia energética brasileira são hídricas (55%), Eólica (14,8%) e Biomassa (8,4%) e das fontes não renováveis, as maiores são Gás Natural (9%), Petróleo (4%) e Carvão Mineral (1,75%).

A matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo. A geração de energia elétrica no mundo é baseada, principalmente, em combustíveis fósseis como carvão e gás natural, em termelétricas. (EPE, 2024)

A matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética, isso porque grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas. A energia eólica também vem crescendo bastante, contribuindo para que a nossa matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável. (EPE, 2024)

A matriz elétrica é apresentada na Figura 10.

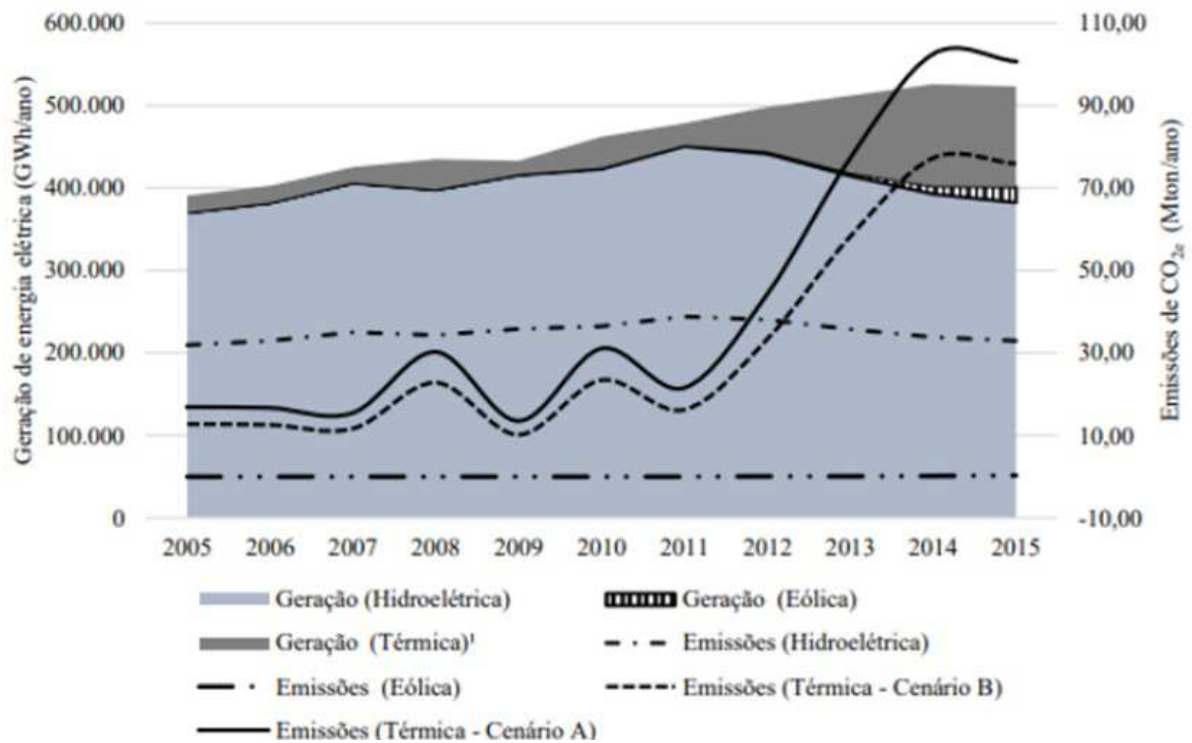
Figura 10: Representação de um sistema híbrido.



Fonte: EPE, 2024).

Embora as fontes mencionadas sejam menos poluentes em comparação com aquelas que utilizam combustíveis fósseis ou com as termelétricas, que são a principal fonte de geração de energia no mundo, elas não são isentas de impactos ambientais e não podem ser consideradas completamente livres de danos. A figura 11 mostra a emissão de GEE entre os anos de 2005 e 2015.

Figura 11: Emissão de GEE devido a análise de ACV



Fonte: Silva (2020).

Um ponto importante a ser destacado é que a análise do gráfico apresentado é realizada com base no estudo da Análise do Ciclo de Vida (ACV). Este método investiga todas as etapas da cadeia produtiva e suas consequências em relação aos recursos utilizados, aos danos ecológicos e ao impacto na vida humana. Em outras palavras, mesmo que não haja emissão de gás carbônico ou de outros gases de efeito estufa durante o processo de geração de energia, a liberação desses gases durante a fase de produção deve ser contabilizada. (MFUMU, 2021).

Como já foi relatado, as hidrelétricas representam a principal fonte de energia elétrica no Brasil, utilizando um recurso renovável. No entanto, sua construção e operação têm impactos negativos significativos nas ecologias locais. Um dos principais problemas é o desvio do curso natural dos rios, que afeta o ciclo de reprodução de várias espécies de peixes (CEMIG, 2016)

Ou seja, todas fontes de energia apresentam algum impacto ambiental no seu ciclo de vida, ainda que sejam de fontes limpas de geração, têm as suas limitações de produção, muitas vezes associadas com a indisponibilidade de recursos ou condições climáticas. Estas limitantes de uma ou outra fonte exigem que as matrizes de geração sejam diversificadas. (MFUMU, 2021).

Além disso, a construção de usinas hidrelétricas (UHEs) provoca o deslocamento forçado de comunidades, como ocorreu em Itueta, Minas Gerais, onde a realocação resultou em problemas psicológicos para os moradores em razão da perda de suas memórias afetivas. (COSTA, 2011)

A energia eólica, apesar de suas vantagens como uma fonte renovável de energia, não está isenta de impactos ambientais. Os parques eólicos podem causar desmata-

mento, fragmentação de habitats e até mesmo a extinção de espécies. Além disso, as comunidades locais frequentemente enfrentam problemas sociais e de saúde, como a perda de território e mudanças na disponibilidade de recursos. A instalação de turbinas requer grandes áreas e pode interferir na fauna local, levando à mortalidade de aves devido ao movimento das lâminas das turbinas.

Por outro lado, os impactos ambientais da energia eólica incluem questões relacionadas ao ruído e à sombra gerados pelas turbinas. Estudos têm mostrado que o som produzido por parques eólicos, composto por ruídos mecânicos e aerodinâmicos, pode alcançar níveis incômodos para as comunidades vizinhas. Em uma pesquisa realizada na comunidade de Xavier, no Ceará, foram medidos níveis de ruído que ultrapassavam os limites recomendados, gerando desconforto para 25% dos moradores e percepção do ruído por 81,2% dos entrevistados. (SILVA, 2020)

Além disso, as sombras causadas pelo movimento das lâminas das turbinas, conhecidas como "efeito de sombra", podem também impactar a qualidade de vida das pessoas que vivem nas proximidades. Esses efeitos podem variar dependendo da posição das turbinas, do ângulo do sol e da topografia do terreno, levando a interrupções e incômodos durante determinadas horas do dia. (SILVA, 2020)

No Brasil, especialmente no bioma da Caatinga, os parques eólicos têm sido criticados por causar desmatamento, há casos em que os parques eólicos afetam inclusive a produção agrícola de subsistência. O que no início era a esperança de renda para a gente pobre do sertão nordestino, agora é um problema de saúde mental. (JORNAL DA USP).

Em resumo, é improvável que qualquer fonte de geração de energia exista sem causar algum impacto ambiental. Isso se dá tanto pela estrutura necessária para a sua implementação quanto pelos resíduos gerados durante a produção. Ou seja, cada modalidade energética traz suas próprias consequências para o meio ambiente.

3.2 Extração da Matéria Prima

O Silício, depois do oxigênio, é o elemento mais abundante do planeta, sendo a crosta terrestre formada por 28% por ele. Além disso, a combinação dos dois elementos gera um grupo chamado de silicatos e estes representam quase 95% da crosta. Apesar da grande quantidade, para fins tecnológicos, dentre elementos desse grupo, apenas o quartzo apresenta viabilidade técnica e econômica para a obtenção de silício (OLIVEIRA et al, 2017).

O ponto de partida para a produção de silício solar é o quartzo (SiO_2), um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre. No entanto, o quartzo usado na produção de silício solar precisa ter um grau elevado de pureza, com baixos níveis de impurezas como ferro, alumínio e cálcio. Esses elementos, mesmo em concentrações mínimas, podem afetar o desempenho das células solares. Segundo estudos, regiões como o Brasil e a Noruega possuem grandes depósitos de sílica de alta pureza, ideais para essa finalidade (FERREIRA; MOREIRA, 2020).

O quartzo pode ser cultivado em autoclaves por meio do processo de crescimento hidrotérmico, que simula as condições encontradas na crosta terrestre, onde o quartzo natural se recristaliza em solução aquosa sob alta pressão e temperatura

(LUCAS et al., 2022). Apesar de ser considerado um mineral de alta pureza, o quartzo natural pode conter traços de diversos elementos, como alumínio, manganês, boro, molibdênio, cálcio, níquel, magnésio, zircônio, vanádio, ferro, titânio, cobre, fósforo e cromo (LUCAS et al., 2022).

Após sua extração, o quartzo é submetido a um processo de redução térmica em fornos de arco elétrico, no qual é misturado com agentes redutores, como coque ou carvão vegetal. Durante esse processo, o quartzo é aquecido a temperaturas superiores a 1900 °C, o que resulta na produção de silício metalúrgico com pureza entre 98% e 99%, ainda inadequado para aplicações fotovoltaicas (OLIVEIRA; SILVA, 2021).

3.2.1 Produção de silício em Grau Solar

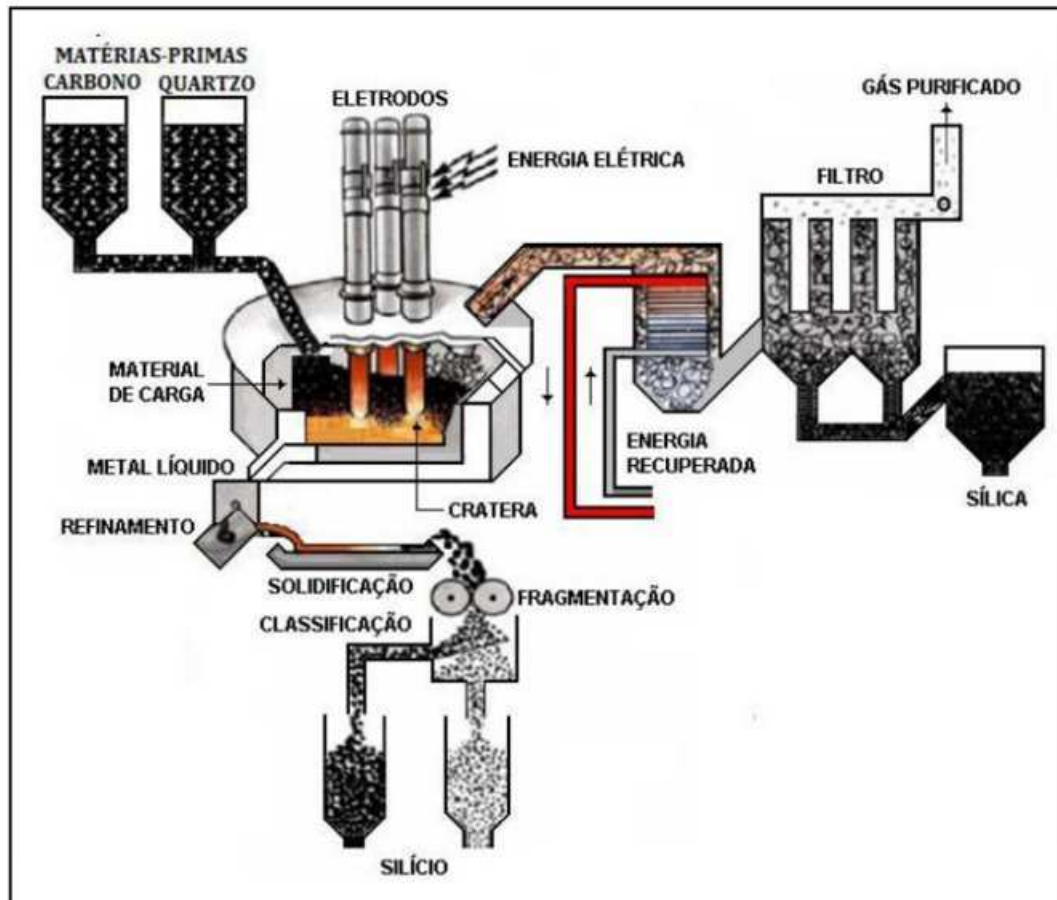
A produção de silício grau solar (SiGS) é um processo fundamental para a indústria fotovoltaica, essencial na fabricação de células solares que convertem a luz solar em eletricidade. O SiGS é produzido a partir de silício metalúrgico, que é submetido a processos de purificação para alcançar a alta pureza necessária (MONGELLI et al., 2021). Este processo é crucial, uma vez que a eficiência das células solares é diretamente relacionada à pureza do silício utilizado.

Na produção de silício grau metalúrgico (SiGM) de alta pureza, o quartzo é adicionado ao forno, podendo ser obtido através da britagem e moagem de lascas de quartzo previamente caracterizadas. Os redutores utilizados nesse processo incluem carvão vegetal, coque e cavaco de madeira, sendo o cavaco empregado para melhorar a permeabilidade da carga em relação ao contrafluxo dos gases gerados durante a redução (FISCHER et al., 2021; MONGELLI et al., 2021).

O forno a arco elétrico é o equipamento predominante utilizado para a produção de SiGM em escala industrial. Este processo é ilustrado na Figura 8, que demonstra a configuração e funcionamento do forno (RAKITA et al., 2022). A escolha desse tipo de forno é fundamental, pois permite a geração das altas temperaturas necessárias para a reação de redução do quartzo, resultando em silício metalúrgico de qualidade superior.

A figura 12 ilustra um forno a arco elétrico.

Figura 12: Forno a arco elétrico.



Fonte: MIRVAGNES (2008).

O silício grau metalúrgico (SiGM) apresenta um teor de silício que varia entre 98,70% e 99,50%. A sua obtenção ocorre por meio da redução carbotérmica do quartzo, utilizando agentes redutores em fornos de arco elétrico, um processo que possibilita a produção em larga escala (RAKITA et al., 2022).

A Tabela 1 apresenta os teores típicos das impurezas que podem ser encontradas no SiGM. Os níveis de impurezas são geralmente medidos em partes por milhão (ppm), destacando-se os teores de boro e fósforo, que são elementos dopantes no SiGS. A remoção dessas impurezas é crucial, pois, nas etapas subsequentes, esses elementos devem ser adicionados em concentrações bem definidas e controladas para garantir o desempenho ideal das células solares (MONGELLI et al., 2021; THOMPSON et al., 2023).

Tabela 1: Principais impurezas do SiGM com destaque para os teores de boro e fósforo.

ELEMENTOS	CONCENTRAÇÃO (ppm)	ELEMENTOS	CONCENTRAÇÃO (ppm)
Alumínio	1200-4000	Zircônio	30
Manganês	70-8-	Vanádio	100-200
Boro	37-45	Ferro	1600-3000
Molibdênio	< 10	Titânio	150-200
Cálcio	590	Cobre	24-90
Níquel	40-80	Fósforo	27-30
Cromo	50-140	-	-

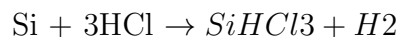
Fonte: ERGUI (2010).

3.2.2 Processos de Purificação

O método mais comum para purificação do silício metalúrgico é o processo Siemens, que envolve a conversão do silício em triclorossilano (SiHCl_3) e, em seguida, a decomposição deste em um reator a altas temperaturas, resultando em silício de alta pureza (SANTANA et al., 2020).

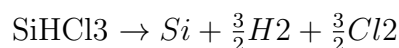
O processo Siemens é essencial para a fabricação de células solares. Desenvolvido na década de 1950, esse processo envolve diversas etapas que asseguram a remoção de impurezas, incluindo metais pesados e outros elementos que podem impactar negativamente o desempenho do silício em aplicações fotovoltaicas. A técnica começa com a conversão do silício metalúrgico em triclorossilano (SiHCl_3) por meio da reação com cloro, seguida pela decomposição térmica do triclorossilano, onde o silício puro é depositado em filamentos. Este método é eficiente, mas requer um consumo elevado de energia, o que representa um desafio para a sustentabilidade do processo (SILVA; PEREIRA, 2021).

O processo Siemens consiste em converter o silício metalúrgico (Si) em triclorossilano (SiHCl_3). Isso é feito pela reação do silício com ácido clorídrico (HCl) em altas temperaturas (geralmente entre 300 °C e 500 °C). Durante essa reação, o silício reage com o cloro para formar triclorossilano, que é um gás à temperatura ambiente. A reação pode ser representada pela seguinte equação:



O triclorossilano obtido é então purificado por destilação fracionada, que separa o SiHCl_3 de outras impurezas. Este método é eficaz para remover compostos indesejados e concentrar o triclorossilano puro (MARTINS, 2022).

Na etapa final, o triclorossilano purificado é descomprimido em um reator, onde é aquecido a temperaturas entre 900 °C e 1.200 °C. Isso resulta na deposição de silício puro em forma de grânulos ou flocos, que pode ser coletado e utilizado na fabricação de células solares. A reação pode ser resumida na seguinte equação:



O processo Siemens é conhecido por sua eficiência na produção de silício de alta pureza (99,9999% ou mais), mas é intensivo em energia e envolve a utilização de substâncias químicas perigosas, o que pode gerar preocupações ambientais. Além disso, a necessidade de destilação e decomposição em altas temperaturas torna o processo caro (COSTA et al., 2023)

Devido ao alto custo energético e ambiental do processo Siemens, novas tecnologias e métodos alternativos têm sido explorados. Processos como a solidificação direcional e o uso de leitos fluidizados estão sendo investigados como opções viáveis e mais sustentáveis para a purificação do silício (ALMEIDA; SILVA, 2023).

3.2.3 A Extração do Cobre

O cobre é amplamente utilizado como condutor elétrico em aplicações residenciais, industriais e comerciais devido às suas excelentes propriedades físicas, mecânicas e químicas. De acordo com a norma ABNT NBR 5410:2004, que trata das instalações elétricas de baixa tensão, o cobre é o material condutor mais recomendado para fiação elétrica, especialmente por sua alta condutividade, resistência à corrosão e maleabilidade.

O cobre desempenha um papel crucial na fabricação de módulos fotovoltaicos, sendo amplamente utilizado em cabos, fios e conexões elétricas devido à sua alta condutividade. O material é indispensável para a interligação das células solares e a transferência de energia gerada pelas placas. A eficiência do cobre na condução elétrica torna-o a escolha preferida na indústria solar, especialmente porque a durabilidade e a capacidade de suportar altas temperaturas são fatores importantes para os módulos que operam por décadas em ambientes externos (Wang, Liu & Chen, 2023).

O cobre é extraído principalmente de minas a céu aberto, um processo que gera grandes quantidades de rejeitos e requer a remoção de vastas áreas de solo superficial. A calcopirita (CuFeS_2), principal minério de cobre, passa por beneficiamento que inclui britagem, moagem e flotação para aumentar sua concentração, seguido de refino pirometalúrgico ou hidrometalúrgico. O método pirometalúrgico é o mais comum, embora seja altamente intensivo em energia e resulte em grandes emissões de dióxido de enxofre (SO_2) e GEE, especialmente quando o carvão é usado como fonte de energia (Gonçalves et al., 2022).

Por outro lado, o processo hidrometalúrgico é menos poluente, utilizando soluções químicas para dissolver o cobre. Contudo, a eficiência energética desse método varia conforme a qualidade do minério, e o processo gera resíduos líquidos potencialmente tóxicos, como ácidos e metais pesados, que podem contaminar lençóis freáticos e corpos d'água (Moreira & Lima, 2023).

A mineração de cobre causa significativa degradação ambiental, resultando em paisagens degradadas e desmatamento, além de poluição hídrica causada pelos produtos químicos utilizados na extração. Estudos mostram que a extração de uma tonelada de cobre gera entre 2 e 5 toneladas de rejeitos, que podem conter metais pesados, como chumbo, cádmio e mercúrio. Esses rejeitos, se não forem gerenciados adequadamente, podem resultar em contaminação das águas superficiais e

subterrâneas, agravando os problemas de saúde pública nas comunidades próximas às minas (Oliveira et al., 2022).

3.2.4 A Extração da Prata

A prata é utilizada nas trilhas condutoras das células solares, atuando na coleta e transferência de eletricidade gerada pelos fótons capturados. Apesar de a quantidade de prata utilizada por célula estar diminuindo com o avanço da tecnologia, o crescimento da demanda global por placas solares continua a impulsionar a mineração de prata. A substituição da prata por outros materiais condutores, como o cobre, tem sido pesquisada, mas até o momento, a prata permanece insubstituível devido às suas propriedades físicas superiores (Silva & Santos, 2021; Souza, 2020).

A prata é frequentemente extraída como subproduto da mineração de metais como chumbo, zinco e cobre, com seu refino envolvido em processos de lixiviação com cianeto. A extração por cianeto é amplamente usada devido à sua eficiência na separação da prata do minério, mas é altamente controversa por causa do impacto ambiental. O cianeto é extremamente tóxico, e vazamentos em rios e lagos podem devastar ecossistemas aquáticos. Além disso, o processo gera rejeitos ricos em metais pesados, como arsênio e chumbo, que podem contaminar o solo e a água, se não forem tratados adequadamente (Marques & Oliveira, 2021).

Os impactos ambientais da mineração de prata são semelhantes aos da extração de outros metais, com destaque para a contaminação dos corpos d'água e a degradação de grandes áreas de terra. A lixiviação por cianeto, se mal controlada, pode causar catástrofes ambientais, como demonstrado por vários desastres em minas na América Latina e Ásia. Além disso, a mineração de prata gera grandes volumes de resíduos sólidos e líquidos, que devem ser gerenciados com rigor para evitar a contaminação de ecossistemas (Moreira & Lima, 2023).

3.2.5 A Extração do Alumínio

O alumínio é amplamente utilizado em estruturas de suporte e molduras para painéis solares devido à sua leveza, resistência à corrosão e facilidade de reciclagem. Embora o alumínio seja menos condutor que o cobre, sua capacidade de resistir a ambientes severos o torna essencial para a durabilidade dos sistemas solares, especialmente em regiões com clima extremo. A alta refletividade do alumínio também é uma vantagem em aplicações solares concentradas (Silva & Santos, 2021).

O alumínio é extraído da bauxita, um minério encontrado principalmente em regiões tropicais. O processo Bayer, utilizado para refinar a bauxita em óxido de alumínio (alumina), é altamente intensivo em energia e gera grandes volumes de lama vermelha, um resíduo altamente alcalino. Após a obtenção da alumina, o alumínio metálico é produzido por eletrólise no processo Hall-Héroult, que consome cerca de 15.000 kWh por tonelada de alumínio produzido. Esse processo é particularmente problemático em regiões onde a eletricidade é gerada por combustíveis fósseis, aumentando as emissões de GEE (Souza, 2020).

A extração de alumínio causa degradação do solo, perda de biodiversidade e emissão de grandes volumes de GEE. A lama vermelha, subproduto do processo Bayer, é uma das principais preocupações ambientais, já que seu armazenamento

em barragens pode gerar riscos de rompimento e contaminação de ecossistemas aquáticos, como ocorreu no desastre de Ajka, na Hungria, em 2010 (Gonçalves et al., 2022). Além disso, o processo Hall-Héroult também libera gases perfluorocarbonetos (PFCs), que possuem um potencial de aquecimento global até 9.000 vezes maior que o CO₂ (Yang et al., 2020).

3.2.6 Impacto Energético e Emissões de GEE

A produção de metais como o cobre, a prata e o alumínio é notoriamente intensiva em energia, especialmente nas fases de refino. O alumínio, por exemplo, exige uma grande quantidade de eletricidade, especialmente no processo de eletrólise Hall-Héroult. A energia necessária para a produção de uma tonelada de alumínio varia entre 14.000 e 16.000 kWh, dependendo da eficiência da planta e da fonte de energia utilizada (Yang et al., 2020).

Em regiões onde o carvão é a principal fonte de energia, como na China, a pegada de carbono da produção de alumínio é especialmente alta. No entanto, países como a Noruega e o Canadá, que usam hidrelétricas como principal fonte de eletricidade, conseguiram reduzir substancialmente as emissões associadas à produção de alumínio, demonstrando que o uso de fontes de energia renovável pode ser uma estratégia eficaz para mitigar as emissões de GEE no setor de metais (Wang et al., 2023).

As emissões de GEE na produção de metais estão associadas principalmente à queima de combustíveis fósseis para geração de eletricidade e calor nos processos de fundição e refino. O alumínio, em particular, é responsável por uma quantidade significativa de emissões de CO e PFCs, com emissões totais de cerca de 10 a 12 toneladas de CO equivalente por tonelada de alumínio produzido. As emissões de SO e outros poluentes atmosféricos, como o monóxido de carbono (CO), também são comuns nas operações de mineração e fundição de cobre e prata (Silva & Santos, 2021; Oliveira et al., 2022).

3.2.7 Mitigação dos Impactos Ambientais e Alternativas Sustentáveis

Melhorar a eficiência energética nos processos industriais de extração e refino de metais é uma das estratégias mais promissoras para reduzir os impactos ambientais. O uso de fontes renováveis de energia, como energia solar, eólica e hídrica, pode reduzir drasticamente as emissões de GEE associadas à produção de metais. A transição para fontes de energia renováveis já está em curso em vários países, como Noruega e Islândia, onde a energia hidrelétrica é amplamente utilizada para a produção de alumínio, reduzindo a pegada de carbono (Wang et al., 2023).

A reciclagem de metais é uma estratégia eficaz para reduzir a demanda por mineração primária e os impactos ambientais associados. O alumínio, por exemplo, pode ser reciclado indefinidamente sem perder suas propriedades, e a produção de alumínio reciclado consome apenas 5% da energia necessária para produzir alumínio novo a partir da bauxita (Gonçalves et al., 2022). A reciclagem do cobre e da prata também oferece oportunidades significativas de economia de energia e redução de emissões, sendo essencial em um contexto de economia circular para minimizar o impacto ambiental da produção de metais.

3.2.8 Alternativas de Mitigação desses Impactos

A produção, o uso e o descarte desses dispositivos geram impactos ambientais que devem ser cuidadosamente avaliados. Esses impactos vão desde a extração das matérias-primas, como silício, cobre e prata, até o gerenciamento de resíduos após o fim da vida útil dos painéis (Cunha & Almeida, 2022). Portanto, é essencial discutir alternativas de mitigação que possam minimizar os efeitos negativos ao longo do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos.

Durante a fabricação, uma abordagem importante para mitigar os impactos ambientais na fabricação de painéis solares é a utilização de materiais sustentáveis e recicláveis. O silício reciclado, por exemplo, pode diminuir a necessidade de extração de silício virgem, reduzindo o consumo de energia e as emissões de carbono associadas (Alves et al., 2023). Além disso, a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias baseadas em materiais alternativos, como perovskitas, têm demonstrado potencial para reduzir significativamente os impactos ambientais da produção (Santos et al., 2021).

A eficiência energética é fundamental na mitigação dos impactos ambientais da fabricação de painéis solares. A utilização de fontes renováveis de energia, como solar e eólica, nos processos de produção pode reduzir significativamente a pegada de carbono associada à fabricação de painéis fotovoltaicos. Estudos indicam que essa prática pode resultar em uma redução de até 50% nas emissões de GEE (Barros et al., 2022). Além disso, a otimização dos processos industriais para minimizar o desperdício de materiais e energia é uma estratégia viável para promover a sustentabilidade.

Investir em pesquisas para melhorar a eficiência dos painéis fotovoltaicos é outra alternativa para mitigar os impactos ambientais. O aumento da eficiência na conversão de energia solar em eletricidade maximiza a geração de energia, reduzindo a quantidade de material necessário para a fabricação dos painéis (Gonçalves Lima, 2022). Novas tecnologias, como células solares bifaciais e módulos de silício cristalino de alta eficiência, demonstram promissora redução dos impactos ambientais ao longo de sua vida útil.

Um bom monitoramento e manutenção dos sistemas fotovoltaicos são cruciais para garantir a eficiência operacional e minimizar falhas que possam resultar em desperdícios de energia e recursos. A implementação de sistemas de monitoramento remoto com o uso de inteligência artificial pode identificar problemas em tempo real, otimizando a operação e prolongando a vida útil dos painéis (Ribeiro et al., 2023). Práticas de manutenção preditiva são igualmente importantes para evitar quebras e prolongar a vida útil dos sistemas, reduzindo a necessidade de substituições frequentes.

O gerenciamento adequado do fim da vida útil dos painéis fotovoltaicos é fundamental para minimizar os impactos ambientais relacionados ao descarte. A reciclagem de painéis solares possibilita a recuperação de materiais valiosos, como silício, cobre e prata, reduzindo a necessidade de novas extrações e a geração de resíduos (Silva & Oliveira, 2021). No Brasil, iniciativas de coleta e reciclagem de painéis já estão sendo desenvolvidas, buscando criar uma economia circular para a indústria solar.

A adoção de políticas de gestão e regulamentação mais rigorosas é essencial para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte de painéis fotovoltaicos. A implementação de legislações que exijam a reciclagem e o reaproveitamento de materiais ao final da vida útil dos painéis, além da criação de incentivos para a indústria de reciclagem, são fundamentais para garantir que os resíduos sejam gerenciados de forma sustentável (Melo et al., 2022). Campanhas de conscientização para informar os consumidores sobre o descarte adequado de painéis solares também são importantes para aumentar as taxas de reciclagem.

4 Considerações Finais

As considerações finais deste trabalho destacam a relevância e os desafios da produção e uso de painéis fotovoltaicos no contexto da transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. A energia solar fotovoltaica representa uma solução essencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). No entanto, como foi discutido ao longo deste estudo, essa tecnologia, apesar de seus benefícios inegáveis, não é isenta de impactos ambientais, especialmente nas fases de produção e descarte dos seus componentes.

O ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, desde a extração das matérias-primas até o descarte final, envolve uma série de processos que geram impactos negativos ao meio ambiente. A extração de materiais como o silício, o cobre e a prata, essenciais para a fabricação das células solares, é altamente intensiva em energia e recursos naturais. O silício, que é o componente central, requer purificação em alto grau, um processo que envolve o consumo elevado de eletricidade e a emissão de gases nocivos. A produção de metais como o cobre e a prata também é problemática, gerando resíduos tóxicos e exigindo grande quantidade de energia, o que contribui significativamente para a poluição atmosférica e para a degradação de ecossistemas.

Além disso, os impactos ambientais não estão limitados à fase de produção. O descarte inadequado de painéis fotovoltaicos ao final de sua vida útil, que normalmente dura entre 20 e 30 anos, pode liberar substâncias tóxicas como chumbo, cádmio e arsênio no solo e nos corpos d'água, causando contaminação ambiental. Estes materiais, se não forem reciclados ou tratados adequadamente, podem representar sérios riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Dado o crescente uso de painéis solares em todo o mundo, mitigar esses impactos ambientais é uma prioridade. Entre as principais soluções para reduzir os danos estão a adoção de tecnologias mais limpas na produção, o uso de materiais alternativos e a implementação de processos mais eficientes de reciclagem. Tecnologias emergentes, como as células solares de perovskita, têm demonstrado potencial para diminuir a necessidade de extração de silício de alta pureza e reduzir os impactos energéticos associados à fabricação. Além disso, o desenvolvimento de painéis solares bifaciais, que aproveitam a luz refletida, e de módulos de maior eficiência, pode contribuir para aumentar a produção de energia utilizando menos recursos.

A eficiência energética também desempenha um papel central na mitigação dos impactos ao longo da vida útil dos painéis. O aprimoramento contínuo da eficiência de conversão de luz solar em eletricidade reduz a quantidade de material necessário para a fabricação dos painéis, ao mesmo tempo que maximiza a produção de energia. Além disso, o monitoramento remoto e a manutenção preditiva com o uso de tecnologias de inteligência artificial podem garantir uma operação mais eficiente e prolongar a vida útil dos sistemas, reduzindo a necessidade de substituição precoce e minimizando os resíduos gerados.

A implementação de uma economia circular na indústria fotovoltaica, que envolve a reciclagem e o reaproveitamento dos materiais dos painéis solares, é outra medida essencial para mitigar os impactos ambientais. A reciclagem de painéis solares não só recupera materiais valiosos como silício, cobre e prata, como também

evita a extração de novas matérias-primas, economizando energia e reduzindo a pegada de carbono do processo produtivo. No entanto, os desafios para a reciclagem de painéis solares incluem a criação de infraestruturas adequadas, políticas de incentivo e regulamentações rigorosas que garantam o correto descarte e tratamento desses resíduos.

A integração de políticas públicas e a criação de regulamentações mais rígidas para a gestão do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos são essenciais. Essas políticas devem garantir que os fabricantes adotem práticas mais sustentáveis desde a produção até o descarte. Além disso, é fundamental que haja incentivos para a criação de cadeias de reciclagem robustas e programas de conscientização que informem consumidores e empresas sobre a importância do descarte correto e da reciclagem de painéis solares.

O estudo realizado evidencia que, embora a energia solar fotovoltaica seja um dos pilares da transição energética global, sua expansão em larga escala deve ser acompanhada por uma avaliação crítica dos impactos ambientais e pela adoção de medidas para minimizar os danos ao meio ambiente. As tecnologias fotovoltaicas, ao longo das últimas décadas, têm evoluído significativamente, mas ainda há um longo caminho a percorrer para que sejam completamente sustentáveis. O desenvolvimento contínuo de inovações tecnológicas, a implementação de práticas industriais mais eficientes e a promoção de uma economia circular são passos essenciais para garantir que o setor solar continue a crescer de forma ambientalmente responsável.

O futuro da energia solar está diretamente ligado ao compromisso global com a sustentabilidade. Com os avanços esperados na eficiência dos painéis solares e a expansão das infraestruturas de reciclagem, há um grande potencial para que os impactos ambientais associados à produção e descarte de painéis sejam drasticamente reduzidos. A transição para uma matriz energética mais limpa não é apenas uma necessidade urgente para combater as mudanças climáticas, mas também uma oportunidade para construir um futuro em que a energia renovável seja abundante e acessível, com o menor impacto possível sobre o planeta. Assim, a energia solar poderá cumprir seu papel como uma das principais fontes de energia sustentável para as próximas gerações.

Referências

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16690:2018 - Sistemas Fotovoltaicos - Requisitos Mínimos para Aplicações Conectadas à Rede Elétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [2] ALMEIDA, R.; SILVA, J. **Novas abordagens para purificação de silício.** *Revista Brasileira de Tecnologia Solar*, 2023.
- [3] ALVES, R. M.; FARIAS, A. J.; CARDOSO, L. M. **O Potencial do Silício Reciclado na Indústria Fotovoltaica Brasileira.** *Revista Brasileira de Energia*, 2023.
- [4] BARROS, M. T.; LIMA, F. Q.; SANTANA, C. R. **Eficiência Energética na Produção de Painéis Solares: Um Estudo de Caso.** *Revista de Sustentabilidade e Meio Ambiente*, 2022.
- [5] BBC. **Brasil tem mais florestas tropicais intactas do mundo, mas queimadas ameaçam avanço do desmatamento.** Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46424720>. Acesso em: 09 ago. 2024.
- [6] BÖNITZ, F.; HELD, P.; STRAUSS, C. **Directional Solidification and Its Role in the Silicon Solar Cell Industry.** *Renewable Energy*, 2020.
- [7] BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações.** UFRJ, 2008.
- [8] BRASIL. **Brasil reduz dependência de petróleo e gás natural na oferta de energia da matriz energética.** Disponível em: <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/06/brasil-reduz-dependencia-de-petroleo-e-gas-natural-na-oferta-de-energia-da-matriz-energetica>. Acesso em: 01 out. 2024.
- [9] BRASIL. **Combustível do Futuro prioriza uso de fontes alternativas de energia.** Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2021/05/combustivel-do-futuro-prioriza-uso-de-fontes-alternativas-de-energia>. Acesso em: 09 set. 2024.
- [10] BRASIL. **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW.** Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>: :text=Atualmente%20as%20três%20maiores%20fontes,Mineral%20(1%2C75%25);. Acesso em: 09 out. 2024.
- [11] COSTA, M.; SOUSA, P.; OLIVEIRA, R. **Desafios na produção de silício para aplicações fotovoltaicas.** *Energia Ambiente*, 2023.
- [12] CRESESB/CEPEL. **Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.** Potencial Solar SunData v 3.0. 2018. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. Acesso em: 29 abr. 2024.
- [13] CRESESB/CEPEL. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito; Manual de Engenharia para Sistemas Foto-**

- voltaicos. 2014. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 29 abr. 2024.
- [14] CUNHA, J. P.; ALMEIDA, R. R. **Impactos Ambientais da Indústria Fotovoltaica: Uma Análise Crítica**. *Revista de Energias Renováveis*, 2022.
- [15] FERREIRA, A. J.; MOREIRA, T. P. **Exploração de Quartzo de Alta Pureza no Brasil**. *Ciência e Tecnologia de Materiais*, 2020.
- [16] GONÇALVES, J. A.; LIMA, S. T.; OLIVEIRA, A. C. **Impactos Ambientais da Mineração de Cobre: Revisão de Estudos Recentes**. *Revista de Engenharia Ambiental*, 2022.
- [17] JORNAL USP. **Energia eólica enfrenta desafios socioambientais no Nordeste**. Disponível em: <https://jornal.usp.br/noticias/serie-energia-energia-eolica-enfrenta-desafios-socio-ambientais-no-nordeste/>. Acesso em: 09 set. 2024.
- [18] LUCAS, L. B.; SANTANA, R.; PEREIRA, C. **Crescimento hidrotérmico de quartzo: desafios e inovações**. *Journal of Crystallography*, 2022.
- [19] MARQUES, F. S.; OLIVEIRA, P. R. **A Produção de Cobre e Prata na Era das Energias Renováveis: Desafios e Impactos Ambientais**. *Caderno de Energia Sustentável*, 2021.
- [20] MARTINS, A. **Eficácia da destilação fracionada no processo Siemens**. *Química e Tecnologia*, v. 40, n. 3, p. 123-135, 2022.
- [21] MELO, L. S.; SILVA, A. F.; PEREIRA, R. L. **Políticas Públicas para a Gestão de Resíduos de Painéis Fotovoltaicos no Brasil**. *Revista de Políticas Ambientais*, 2022.
- [22] MOREIRA, G. S.; LIMA, V. R. **Lixiviação e Contaminação Ambiental na Mineração de Prata: Um Estudo de Caso**. *Jornal de Mineração Sustentável*, 2023.
- [23] OLIVEIRA, L. M.; SOUZA, F. C.; LIMA, M. P. **Refino de Cobre e Prata: Eficiência Energética e Emissões**. *Estudos de Engenharia Química*, 2022.
- [24] OLIVEIRA, R. S.; SILVA, J. M. **Processos Metalúrgicos na Produção de Silício de Grau Solar**. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, 2021.
- [25] PORTAL DE PERIÓDICOS UFES. **Caracterização das propriedades físicas do solo**. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/items/5d7412cb-8540-4a40-a506-1ec262248998>. Acesso em: 16 jul. 2024.
- [26] REPOSITÓRIO UNESP. **Impactos ambientais de parques eólicos no Brasil**. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/123456789/189520>. Acesso em: 01 out. 2024.
- [27] SIQUEIRA, F. L.; PEREIRA, L. M.; SILVA, P. **Estudo sobre o ciclo de vida do silício e sua aplicação na indústria fotovoltaica**. *Estudos de Engenharia e Meio Ambiente*, 2023.

- [28] SOUZA, J. A.; CUNHA, A. P. **Silício Metálico e sua Importância para o Setor de Energias Renováveis.** *Revista de Energia Solar*, 2023.
- [29] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI. **Estudo sobre a eficiência energética na produção de painéis fotovoltaicos.** Disponível em: <https://ufsj.edu.br/curso/energia-fotovoltaica/>. Acesso em: 17 ago. 2024.
- [30] UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Impacto da mineração na qualidade do ar.** Disponível em: <https://www.ufmg.br/projeto-ar/>. Acesso em: 05 jul. 2024.
- [31] WAGNER, F.; OLIVEIRA, G. L. **Análise do ciclo de vida do silício para painéis fotovoltaicos.** *Ciência e Sustentabilidade*, 2023.
- [32] WEBER, B. **Mercado Brasileiro de Silício: Novos Horizontes.** *Jornal de Energia Solar*, 2022.
- [33] ZAGO, M. **Aspectos críticos da destilação de silício de grau solar.** *Journal de Processos Químicos*, v. 44, n. 1, p. 98-110, 2023.
- [34] ZENDE, P. R.; AMARAL, S. C.; SILVA, T. C. **Estudos sobre reciclagem de resíduos fotovoltaicos: uma análise crítica.** *Revista de Resíduos e Reciclagem*.
- [35] ZOTTO, D. L.; MOREIRA, V. S. **Sustentabilidade e Eficiência Energética na Produção de Silício Metálico.** *Caderno de Sustentabilidade Energética*, 2022.
- [36] ZULIANI, A. L.; NASCIMENTO, J. M. **A Produção de Silício no Brasil e Suas Aplicações na Indústria de Energia.** *Revista Brasileira de Energia Solar*, 2022.
- [37] ZERRES, R. S.; LIMA, F. G. **Reciclagem de Painéis Fotovoltaicos: Oportunidades e Desafios no Brasil.** *Revista de Gestão de Resíduos*.
- [38] Porto Geográfico. **Exploração de Recursos Naturais e Sustentabilidade: Uma Análise Crítica do Brasil.** Disponível em: <https://portogeografico.uff.br/revista/article/view/123/341>. Acesso em: 09 set. 2024.