



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA

CAMPUS CAXIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E FÍSICA

CURSO DE FÍSICA LICENCIATURA

**GESSICA PALOMA ANDRADE DOS SANTOS**

**FONTES DE ENERGIA LIMPA: UMA ANÁLISE DOS FENÔMENOS FÍSICOS E DAS  
POTENCIALIDADES DA ENERGIA SOLAR, EÓLICA E DO HIDROGÊNIO VERDE**

CAXIAS -MA

2026

**GESSICA PALOMA ANDRADE DOS SANTOS**

**FONTES DE ENERGIA LIMPA: UMA ANÁLISE DOS FENÔMENOS FÍSICOS E DAS  
POTENCIALIDADES DA ENERGIA SOLAR, EÓLICA E DO HIDROGÊNIO VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, Campus Caxias, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciada em Física.

**Orientador:** Prof. Dr. Iure da Silva Carvalho

CAXIAS - MA

2026

S237f Santos, Gessica Paloma Andrade dos

Fontes de energia limpa: uma análise dos fenômenos físicos e das potencialidades da energia solar, eólica e do hidrogênio verde / Gessica Paloma Andrade dos Santos. \_\_Caxias: Campus Caxias, 2025.

36f.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Maranhão – Campus Caxias, Curso de Licenciatura em Física.

Orientador: Prof. Dr. Iure da Silva Carvalho.

1. Energia limpa. 2. Energia solar. 3. Energia eólica. 4. Hidrogênio verde. 5. Transição energética. I. Título.

CDU 561.548

**GESSICA PALOMA ANDRADE DOS SANTOS**

**FONTES DE ENERGIA LIMPA: UMA ANÁLISE DOS FENÔMENOS FÍSICOS E DAS  
POTENCIALIDADES DA ENERGIA SOLAR, EÓLICA E DO HIDROGÊNIO VERDE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Licenciatura em Física da  
Universidade Estadual do Maranhão –  
UEMA, Campus Caxias, como requisito  
parcial para a obtenção do título de  
Licenciada em Física.

Aprovado em: 14/01/2026

**BANCA EXAMINADORA:**

Documento assinado digitalmente  
 **IURE DA SILVA CARVALHO**  
Data: 29/01/2026 13:35:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Iure da Silva Carvalho (Orientador)  
Doutor em Física da Matéria Condensada  
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Documento assinado digitalmente  
 **RICARDO GOMES**  
Data: 27/01/2026 19:19:37-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Me. Ricardo Gomes (Avaliador Interno)  
Mestre em Física da Matéria Condensada  
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Documento assinado digitalmente  
 **PEDRO HENRIQUE MACEDO BARROS**  
Data: 27/01/2026 20:01:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Me. Pedro Henrique Macedo Barros (Avaliador Interno)  
Mestre em Física da Matéria Condensada  
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus por tudo o que Ele tem feito em minha vida e por me conceder a oportunidade de chegar até aqui, pois sem Ele eu nada seria. Sou grata pelas bênçãos recebidas ao longo da minha caminhada, em especial por esta conquista, que me proporcionou não apenas crescimento acadêmico, mas também mais conhecimento e amadurecimento pessoal.

Agradeço primeiramente aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo constante e por estarem sempre ao meu lado ao longo de toda essa trajetória.

Agradeço ao meu esposo, por sua paciência, compreensão e motivação contínua, que foram fundamentais para a conclusão deste curso. Agradeço também ao meu filho, que, mesmo ainda tão pequeno, foi meu maior incentivo, inspirando-me a buscar excelência e a ser uma profissional capaz de dar exemplo.

Expresso minha gratidão aos meus professores e orientadores, que, com dedicação, paciência e conhecimento, contribuíram significativamente para minha formação acadêmica, oferecendo suporte e orientação em cada etapa do processo.

Agradeço à Universidade Estadual do Maranhão, campus Caxias, por ser uma instituição de excelência, composta por profissionais competentes e comprometidos. Sou grata a todos os professores, gestores, funcionários e colegas de sala, que compartilharam comigo o amor pela Física e proporcionaram um ambiente de aprendizado enriquecedor, que fortaleceu minha paixão pela profissão docente.

## **RESUMO**

O presente trabalho aborda as fontes de energia limpa, com ênfase na energia solar, na energia eólica e no hidrogênio verde. O objetivo central é compreender os princípios físicos que possibilitam a geração de energia a partir desses recursos e discutir sua relevância no contexto da transição energética e da busca por soluções sustentáveis. A pesquisa será desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, contemplando conceitos de física relacionados ao efeito fotoelétrico, à conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade e aos processos de eletrólise utilizados na obtenção do hidrogênio. Pretende-se, ao final, demonstrar a viabilidade e os benefícios dessas tecnologias em comparação às fontes tradicionais, evidenciando sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética. As fontes de energia limpa destacam-se como alternativas essenciais para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e minimizar os impactos ambientais. A energia solar aproveita a radiação do Sol, que pode ser convertida em eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos ou utilizada para aquecimento em sistemas térmicos. A energia eólica utiliza a força dos ventos para movimentar turbinas ligadas a geradores, transformando a energia cinética do ar em eletricidade de forma sustentável. Já o hidrogênio verde é obtido pela eletrólise da água com o uso de fontes renováveis, resultando em um combustível limpo que libera apenas vapor d'água em sua utilização. Essas alternativas, além de renováveis e abundantes, representam caminhos promissores para a diversificação da matriz energética e para o enfrentamento das mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** energia limpa. Energia solar. Energia eólica. Hidrogênio verde. Transição energética.

## **ABSTRACT**

This study addresses clean energy sources, with emphasis on solar energy, wind energy, and green hydrogen. The main objective is to understand the physical principles that enable energy generation from these resources and to discuss their relevance in the context of the energy transition and the search for sustainable solutions. The research will be developed through a literature review, covering physical concepts related to the photoelectric effect, the conversion of wind kinetic energy into electricity, and the electrolysis processes used to obtain hydrogen. The study aims to demonstrate the feasibility and benefits of these technologies compared to traditional sources, highlighting their contribution to reducing greenhouse gas emissions and diversifying the energy matrix. Clean energy sources stand out as essential alternatives to reduce dependence on fossil fuels and minimize environmental impacts. Solar energy harnesses the Sun's radiation, which can be converted into electricity through photovoltaic panels or used for heating in thermal systems. Wind energy exploits the force of the wind to drive turbines connected to generators, transforming the kinetic energy of the air into electricity sustainably. Green hydrogen is obtained through the electrolysis of water using renewable sources, resulting in a clean fuel that releases only water vapor when used. These alternatives, in addition to being renewable and abundant, represent promising paths for energy diversification and for addressing climate change.

**Keywords:** clean energy. Solar energy. Wind energy. Green hydrogen. Energy transition.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Simulação Efeito fotoelétrico .....  | 15 |
| <b>Figura 2</b> – Energia Eólica, movimento do ar..... | 17 |
| <b>Figura 3</b> - Tecnologia Fotovoltaica.....         | 21 |
| <b>Figura 4</b> – Sistema solar térmicos.....          | 22 |

## SUMÁRIO

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                   | 10 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....  | 12 |
| 2.1 ENERGIA LIMPA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL..... | 12 |
| 2.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DAS FONTES DE ENERGIA.....   | 13 |
| 2.2.1 EFEITO FOTOELÉTRICO E ENERGIA SOLAR.....       | 14 |
| 2.2.2 MOVIMENTO DO AR E ENERGIA EÓLICA.....          | 18 |
| 2.2.3 ELETRÓLISE DA ÁGUA E HIDROGÊNIO VERDE.....     | 19 |
| 3. METODOLOGIA.....                                  | 21 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                       | 22 |
| 4.1 ENERGIA SOLAR.....                               | 23 |
| 4.1.1 Tecnologias de captação e conversão.....       | 24 |
| 4.1.2 Vantagens e desafios.....                      | 26 |
| 4.2 ENERGIA EÓLICA.....                              | 27 |
| 4.2.1 Tipos de turbinas eólicas.....                 | 28 |
| 4.2.2 Potencial e limitações.....                    | 29 |
| 4.3 HIDROGÊNIO VERDE.....                            | 30 |
| 4.3.1 Produção, armazenamento e aplicações.....      | 30 |
| 4.3.2 Perspectivas e Desafios.....                   | 31 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                         | 32 |
| REFERÊNCIAS.....                                     | 33 |

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado ao avanço tecnológico e à expansão das atividades industriais, tem provocado um aumento expressivo da demanda por energia em escala global. Esse cenário evidencia a dependência histórica da sociedade moderna em relação às fontes de energia tradicionais, especialmente os combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural. Apesar de sua ampla utilização, essas fontes energéticas estão associadas a diversos impactos ambientais negativos. A queima de combustíveis fósseis é uma das principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para o aquecimento global, a intensificação das mudanças climáticas e a degradação dos ecossistemas naturais (IPCC, 2023).

Diante dessas consequências, a busca por alternativas energéticas mais limpas e sustentáveis tornou-se uma prioridade no cenário internacional. As fontes de energia renovável surgem como soluções viáveis para atender às necessidades energéticas atuais sem comprometer a disponibilidade de recursos naturais para as futuras gerações, promovendo o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental. Nesse contexto, destacam-se a energia solar, a energia eólica e o hidrogênio verde, que vêm ganhando espaço nas discussões sobre a transição energética global. Essas fontes apresentam baixo impacto ambiental e possuem grande potencial de expansão, sendo consideradas estratégicas para a redução das emissões de carbono e para o cumprimento das metas climáticas estabelecidas em acordos internacionais, como o Acordo de Paris (IEA, 2024).

A utilização eficiente dessas fontes de energia está diretamente relacionada à compreensão de seus fundamentos físicos. A energia solar baseia-se no efeito fotoelétrico, fenômeno responsável pela conversão da radiação solar em energia elétrica por meio das células fotovoltaicas. Já a energia eólica fundamenta-se na transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica, processo influenciado por fatores atmosféricos e aerodinâmicos. Por sua vez, o hidrogênio verde apresenta-se como uma alternativa energética inovadora, sendo produzido por meio da eletrólise da água, processo que utiliza energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Esse método permite a obtenção de hidrogênio sem emissão de dióxido de carbono, tornando-o um importante vetor energético para o armazenamento e o transporte de energia limpa (PENA, 2025).

Além dos aspectos físicos, torna-se essencial analisar a eficiência energética dessas fontes, considerando fatores como rendimento, disponibilidade dos recursos naturais e viabilidade técnica. Embora apresentem inúmeras vantagens ambientais, a implementação dessas tecnologias em larga escala ainda enfrenta desafios econômicos, tecnológicos e estruturais, como os custos de produção, a necessidade de investimentos em infraestrutura e a intermitência da geração de energia, especialmente no caso das fontes solar e eólica. No contexto brasileiro, a relevância das fontes de energia limpa é ainda mais evidente. O Brasil possui elevado potencial para a geração de energia solar e eólica, além de condições favoráveis para o desenvolvimento do hidrogênio verde, em razão da abundância de recursos renováveis e da crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis. A diversificação da matriz energética nacional contribui para o fortalecimento da segurança energética e para a redução da dependência de fontes não renováveis (ANEEL, 2023).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo investigar os fundamentos físicos que possibilitam a geração de energia a partir de fontes limpas, com ênfase na energia solar, eólica e no hidrogênio verde. Busca-se analisar os fenômenos físicos envolvidos nos processos de conversão energética, destacando os princípios de funcionamento, os níveis de eficiência e as aplicações dessas fontes. Por fim, pretende-se discutir as potencialidades futuras dessas tecnologias, bem como os desafios associados à sua implementação em larga escala, evidenciando sua importância estratégica no cenário energético contemporâneo. Assim, este estudo contribui para a compreensão do papel das energias limpas na construção de um modelo energético mais sustentável, alinhado aos princípios da transição energética e aos compromissos globais de enfrentamento das mudanças climáticas.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 Energia limpa e desenvolvimento sustentável**

A busca por fontes de energia limpa tem se tornado uma das principais estratégias globais para promover o desenvolvimento sustentável. As energias limpas, também chamadas de renováveis, são aquelas obtidas de recursos naturais que se renovam continuamente, como a luz solar, o vento, a água e a biomassa. Diferente dos combustíveis fósseis, essas fontes não liberam grandes quantidades de gases de efeito estufa, sendo essenciais para reduzir os impactos ambientais e mitigar as mudanças climáticas. Conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, a transição para uma matriz energética limpa é fundamental para limitar o aquecimento global a níveis seguros (IPCC, 2022).

O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu oficialmente em 1987, com o Relatório Brundtland, que o definiu como aquele que “atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades”. Nesse contexto, o uso de energia limpa está diretamente relacionado ao equilíbrio entre crescimento econômico, inclusão social e preservação ambiental. Países que investem em tecnologias renováveis demonstram avanços não apenas na redução da poluição, mas também na geração de empregos e inovação tecnológica. Além do impacto ambiental positivo, as fontes de energia limpa contribuem para a segurança energética, reduzindo a dependência de combustíveis importados e fortalecendo economias locais (SOUZA, 2025).

O Brasil, por exemplo, possui grande potencial em energia solar, eólica e biomassa, o que o coloca em posição estratégica para liderar a transição energética na América Latina. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável, o país pode alcançar até 80% de eletricidade proveniente de fontes renováveis até 2050, caso mantenha os investimentos atuais (IRENA, 2023).

A adoção de políticas públicas voltadas à energia limpa é indispensável para consolidar o desenvolvimento sustentável. Investimentos em pesquisa, incentivos fiscais e educação ambiental são medidas essenciais para ampliar o uso de tecnologias limpas e conscientizar a sociedade sobre o papel de cada indivíduo na preservação dos recursos naturais. Assim, energia limpa e desenvolvimento sustentável são conceitos que caminham juntos, representando a base para um futuro mais equilibrado, eficiente e ecologicamente responsável (SACHS, 2019).

A mudança da matriz energética atual para um modelo que seja menos agressivo ao meio ambiente tem um papel primordial para a sociedade consiga implementar eficiência de energia e desenvolvimento sustentável no âmbito global. O texto de Pietro Erber (2025)

mostra como ainda dependemos fortemente de combustíveis fósseis, como o gás e o petróleo, para gerar energia.

Ele destaca que mudar essa realidade é um grande desafio, pois envolve transformar toda a estrutura produtiva desde os meios de transporte até os bens de consumo. Alguns países mais desenvolvidos já estão avançando nesse processo, mas em regiões onde o petróleo é a base da economia, essa transição ocorre de forma mais lenta. No entanto, o uso de fontes limpas e renováveis traz benefícios importantes a longo prazo, como a preservação das florestas, dos oceanos e da produção de alimentos, reduzindo os impactos do aquecimento global e do efeito estufa (ERBER, 2025).

## **2.2 Fundamentos físicos das fontes de energia**

As fontes de energia, sejam elas renováveis ou não renováveis, baseiam-se em princípios físicos fundamentais relacionados à conversão de energia de uma forma para outra. De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, há uma conservação de energia. Assim, toda geração de energia elétrica parte da conversão de uma forma de energia primária, como a radiação solar, o movimento do vento ou a força da água, em energia elétrica utilizável. Esse princípio é a base de funcionamento de praticamente todos os sistemas energéticos atuais. (HALLIDAY, 2021.)

No caso das fontes de energia limpa, os processos de conversão envolvem fenômenos naturais que ocorrem de forma contínua e cíclica na natureza. Na energia solar, por exemplo, o efeito fotovoltaico transforma a luz do Sol em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando fótons atingem um material semicondutor, como o silício, excitando elétrons e gerando uma corrente elétrica. Esse processo foi descoberto por Edmond Becquerel em 1839 e aprimorado com o desenvolvimento das células solares modernas. A energia eólica, por sua vez, tem como base o movimento das massas de ar causado pelas diferenças de temperatura e pressão na atmosfera. A energia cinética do vento é convertida em energia mecânica por meio das pás das turbinas e, posteriormente, em energia elétrica através de um gerador. A eficiência dessa conversão depende de fatores como a velocidade do vento, o design das turbinas e as condições do terreno. Esse tipo de transformação segue os princípios da conservação da energia mecânica e da transferência de momento (MANWELL, 2019).

Já o hidrogênio verde baseia-se em reações eletroquímicas. Ele é produzido por meio da eletrólise da água, processo em que a energia elétrica (proveniente de fontes renováveis) é

utilizada para separar as moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  em hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ). O hidrogênio obtido pode então ser armazenado e convertido novamente em eletricidade por meio de células a combustível, que realizam a reação inversa, combinando o hidrogênio com o oxigênio para gerar energia e água como subproduto. Trata-se de um processo limpo e de alta eficiência energética (TURNER, 2004).

Com base nesses fundamentos físicos, compreende-se que todas as fontes de energia, embora diferentes em seus mecanismos, seguem os mesmos princípios de conservação e transformação de energia. A aplicação desses conceitos permite o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, capazes de atender às necessidades energéticas da sociedade sem comprometer o equilíbrio ambiental (TIPLER, 2020).

### **2.2.1 Efeito fotoelétrico e energia solar**

O efeito fotoelétrico é um fenômeno físico essencial para compreender o funcionamento das tecnologias que transformam a luz solar em energia elétrica. Ele ocorre quando a radiação eletromagnética incide sobre certos materiais, geralmente metálicos ou semicondutores, e provoca a liberação de elétrons. A energia luminosa (fótons) transfere energia suficiente para que os elétrons escapem da superfície do material, originando uma corrente elétrica. O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por uma superfície metálica quando esta é iluminada por radiação eletromagnética com energia suficiente. Esse fenômeno foi explicado por Albert Einstein (1905), ao propor que a luz possui comportamento corpuscular, sendo composta por fótons. (RESNICK, R, 2025)

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando este é submetido à incidência de radiação eletromagnética com frequência suficientemente elevada. Esse fenômeno foi observado experimentalmente no final do século XIX, mas não encontrou explicação satisfatória no âmbito da Física Clássica, a qual considerava a luz exclusivamente como uma onda contínua. De acordo com Bertoldo, as explicações clássicas falhavam ao tentar justificar a dependência do efeito em relação à frequência da radiação incidente, evidenciando a necessidade de um novo modelo teórico (BERTOLDO, 2018).

A explicação do efeito fotoelétrico foi proposta por Albert Einstein em 1905, ao introduzir a ideia de que a luz é composta por pacotes discretos de energia, denominados fótons. Segundo essa interpretação, cada fóton possui energia proporcional à frequência da radiação, o que permite explicar por que apenas luz acima de uma determinada frequência é

capaz de provocar a emissão de elétrons. Conforme destaca Bertoldo, “a energia transportada pela radiação eletromagnética não é distribuída de forma contínua, mas sim em quantidades discretas” (BERTOLDO, 2018, s.p.).

Um conceito fundamental associado ao efeito fotoelétrico é a função trabalho, definida como a energia mínima necessária para remover um elétron da superfície do material. Cada material possui uma função trabalho característica, o que implica a existência de uma frequência mínima, chamada de frequência de corte, abaixo da qual o efeito não ocorre. Bertoldo ressalta que o aumento da intensidade da luz não é suficiente para provocar a emissão de elétrons caso a frequência da radiação seja inferior à frequência de corte do material (BERTOLDO, 2018).

De acordo com a teoria corpuscular da luz, proposta por Max Planck e empregada por Albert Einstein na explicação do efeito fotoelétrico, a luz é constituída por um grande número de fótons. Os fótons são partículas sem massa que transportam quantidades discretas de energia. A energia associada a cada fóton é diretamente proporcional à frequência da radiação incidente, sendo essa relação expressa por meio da constante de Planck, cujo. Essa relação é descrita pela equação:

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

Essa formulação foi fundamental para a compreensão do efeito fotoelétrico, pois demonstra que a energia transferida aos elétrons depende da frequência da luz, e não de sua intensidade, contrariando as previsões da teoria clássica da radiação. em que **E** representa a energia do fóton, **h** é a constante de Planck e **f** corresponde à frequência da luz incidente.

Caso a energia de um fóton seja suficientemente grande, ele pode arrancar elétrons do material. A energia cinética do elétron ejetado pode ser determinada por meio da seguinte equação:

$$hf = K_{max} + \Phi \quad (2)$$

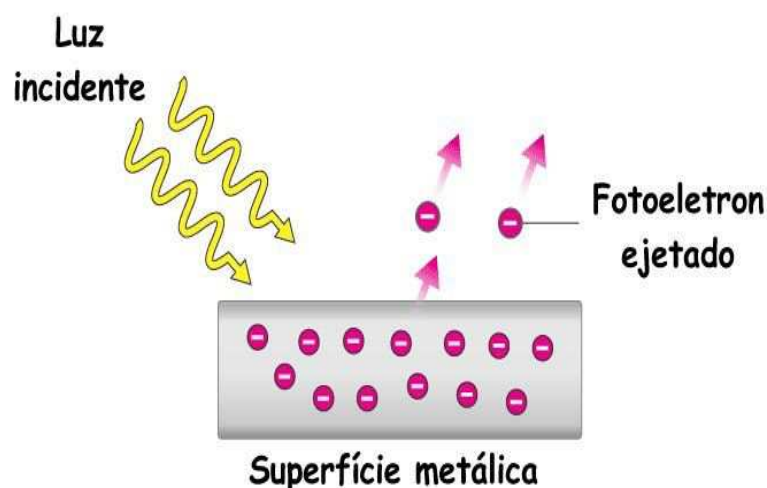
De acordo com a equação apresentada, a energia cinética adquirida pelos elétrons (**K**) depende da energia dos fótons incidentes (**hf**) e da função trabalho (**Φ**). Essa grandeza representa a quantidade de energia potencial que mantém os elétrons ligados ao material,

correspondendo à energia mínima necessária para que eles sejam arrancados da superfície. Existe uma grandeza, denominada função trabalho, que corresponde à energia mínima necessária para remover um elétron da superfície de um material. Essa grandeza não depende da frequência da luz incidente, estando relacionada exclusivamente à natureza do material. A função trabalho é geralmente expressa em elétron-volt (eV). Assim, a energia que excede esse valor mínimo é transferida aos elétrons na forma de energia cinética. É importante destacar que a energia cinética dos elétrons emitidos depende exclusivamente da frequência da luz incidente, e não da intensidade da radiação emitida. (TIPLER; MOSCA, 2020).

Função trabalho ( $\Phi$ ) corresponde à menor quantidade de energia necessária para que um elétron seja removido da superfície de um material metálico, superando as forças que o mantêm ligado ao átomo. Esse valor é característico de cada material e está diretamente relacionado à sua estrutura eletrônica. Quando a energia do fóton incidente é superior à função trabalho do material, a energia excedente é transferida ao elétron na forma de energia cinética, conforme descrito pela equação do efeito fotoelétrico. Além de sua relevância teórica, o efeito fotoelétrico possui importantes aplicações tecnológicas. (BERTOLDO, 2018)

O fenômeno está presente no funcionamento de dispositivos fotoelétricos, sensores de luminosidade e constitui a base física das células fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica. Dessa forma, o estudo do efeito fotoelétrico contribui diretamente para a compreensão dos princípios físicos envolvidos no desenvolvimento e na expansão das fontes de energia limpa e renovável, especialmente a energia solar. O efeito fotoelétrico apresenta três resultados fundamentais: Existência de frequência de corte, dependente do material; Energia cinética dos elétrons aumenta com a frequência da luz; a intensidade da luz influencia apenas o número de elétrons emitidos, e não sua energia. Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por Heinrich Hertz em 1887 e explicado teoricamente por Albert Einstein em 1905, o que lhe garantiu o Prêmio Nobel de Física em 1921 (HELERBROCK, 2025).

Figura 1- Simulação Efeito fotoelétrico



Fonte: Site do UFRGS, 2024.

Nas células fotovoltaicas modernas, o efeito fotoelétrico é explorado por meio de materiais semicondutores, como o silício, que absorvem os fótons provenientes da luz solar. Quando essa absorção acontece, os elétrons do material ganham energia e passam de uma camada de menor energia (banda de valência) para uma de maior energia (banda de condução), gerando uma diferença de potencial elétrico. Essa diferença cria uma corrente elétrica contínua, que pode ser convertida em energia elétrica utilizável através de inversores. Assim, o efeito fotoelétrico é o princípio básico que permite a conversão direta da energia solar em eletricidade limpa e renovável (BOYELDIEU, 2019; CRESESB, 2023).

O estudo e a aplicação do efeito fotoelétrico foram fundamentais para o avanço das tecnologias sustentáveis. A compreensão desse fenômeno permitiu o desenvolvimento de painéis solares mais eficientes, capazes de absorver uma quantidade maior de luz e converter essa energia de forma mais eficaz. Dessa maneira, o aproveitamento da energia solar por meio do efeito fotoelétrico representa uma alternativa promissora para a diversificação da matriz energética e para a diminuição da dependência de fontes poluentes, contribuindo com os objetivos globais de sustentabilidade. (IEE-USP, 2024)

### 3.2.2 Movimento do ar e energia eólica

A energia eólica tem origem direta no movimento do ar, que é resultado das diferenças de temperatura e pressão atmosférica provocadas pela incidência da radiação solar sobre a superfície da Terra. Quando o Sol aquece desigualmente diferentes regiões do planeta, como oceanos, montanhas e planícies, o ar quente tende a subir, e o ar frio, mais denso, desloca-se para ocupar seu lugar. Esse deslocamento gera os ventos, que representam uma forma de energia cinética passível de conversão em energia mecânica e elétrica. Assim, o vento é, na verdade, uma manifestação indireta da energia proveniente da radiação solar (Silva, 2019)

Figura 2- Energia Eólica, movimento do ar



Fonte: Site do Echo energia, 2025.

O aproveitamento da energia eólica ocorre por meio de aerogeradores, dispositivos compostos por hélices conectadas a um eixo e a um gerador elétrico. Quando o vento movimenta as pás, a energia cinética do ar é convertida em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. A eficiência do processo depende da velocidade dos ventos, da densidade do ar e do design das turbinas. Locais com ventos constantes e intensos, como regiões litorâneas e áreas elevadas, são mais propícios para a instalação de parques eólicos.

Fisicamente, a energia eólica pode ser descrita pela equação da potência do vento. A energia cinética de uma massa de ar  $m$  em movimento a uma velocidade  $v$  é dada por:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3)$$

Considerando a mesma massa de ar  $m$  em movimento a uma velocidade  $v$ . Pode-se demonstrar que a potência disponível transversal ao fluxo de ar, é dada por

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Onde  $P$  representa a potência do vento, medida em watts (W), que corresponde à quantidade de energia disponível no escoamento do ar;  $\rho$  é a massa específica do ar, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), indicando a densidade do ar no local, a qual pode variar conforme a altitude, a temperatura e a pressão atmosférica;  $A$  refere-se à área da seção transversal perpendicular ao vento, em metros quadrados ( $\text{m}^2$ ), geralmente associada à área varrida pelas pás do aerogerador; e  $v$  é a velocidade do vento, medida em metros por segundo ( $\text{m/s}$ ), sendo um dos fatores mais relevantes, pois a potência disponível no vento cresce proporcionalmente ao cubo da velocidade, o que evidencia a importância de ventos constantes e intensos para a geração eficiente de energia eólica.

É demonstrada a relação entre a massa de ar em movimento e sua velocidade. A potência disponível é proporcional ao cubo da velocidade do vento, o que significa que pequenas variações na velocidade resultam em grandes diferenças na quantidade de energia gerada. Isso explica a importância de análises meteorológicas e estudos de viabilidade antes da instalação de um parque eólico, garantindo a maximização da produção de energia. (CRESESB, 2025).

A expansão da energia eólica tem se destacado mundialmente por seu caráter sustentável e por não emitir gases de efeito estufa durante a operação. No Brasil, o potencial eólico é expressivo, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, onde a constância e intensidade dos ventos favorecem a geração elétrica em larga escala. Essa fonte contribui significativamente para a diversificação da matriz energética brasileira e para a redução da dependência de combustíveis fósseis. Além dos benefícios ambientais, a energia eólica também gera impactos socioeconômicos positivos, como a criação de empregos e o desenvolvimento de comunidades locais.

Entretanto, desafios ainda existem, como o descarte de pás e componentes ao final da vida útil e a necessidade de tecnologias que garantam o armazenamento ou a complementação da energia gerada em períodos de baixa intensidade de vento. A pesquisa e a inovação tecnológica têm sido essenciais para o aprimoramento desse setor e para o fortalecimento da transição energética global (GWEC, 2024).

### 3.2.3 Eletrólise da água e hidrogênio verde

A eletrólise da água é o processo químico que permite a separação da molécula de  $H_2O$  em hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) por meio da passagem de uma corrente elétrica. Essa técnica é uma das formas mais promissoras para a obtenção de hidrogênio limpo, especialmente quando a eletricidade utilizada provém de fontes renováveis, como a solar ou a eólica. O fenômeno ocorre em um eletrólito, onde dois eletrodos, ânodo e cátodo, promovem as reações de oxidação e redução responsáveis pela decomposição da água. Assim, o hidrogênio produzido por esse método é denominado “hidrogênio verde”, por não gerar emissões de gases de efeito estufa durante sua produção (TURNER, 2004).

O hidrogênio verde se destaca por sua versatilidade e pelo potencial de ser utilizado como vetor energético, ou seja, um meio de armazenar e transportar energia limpa. Diferente do hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis, o verde é obtido sem gerar  $CO_2$ , sendo uma alternativa sustentável para setores industriais, de transporte e geração elétrica. A eficiência do processo depende de fatores como o tipo de eletrólito utilizado (alcalino, PEM ou óxido sólido), a temperatura de operação e a pureza da água. Pesquisas recentes têm buscado otimizar a eficiência energética da eletrólise e reduzir seus custos, tornando o hidrogênio competitivo frente aos combustíveis tradicionais. (LIMA, 2022).

O principal desafio econômico do hidrogênio verde é o alto custo da eletrólise, que atualmente é mais caro do que a produção a partir de gás natural. Contudo, com a expansão das fontes renováveis e o avanço tecnológico dos eletrolisadores, há uma tendência de redução significativa desses custos nos próximos anos. Países como Alemanha, Japão e Brasil têm investido em projetos-piloto para integrar o hidrogênio verde às suas matrizes energéticas, com o objetivo de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e alcançar as metas climáticas do Acordo de Paris. (OLIVEIRA, 2023),

Além de ser uma alternativa sustentável, o hidrogênio verde pode desempenhar um papel essencial na chamada “economia do hidrogênio”, contribuindo para o armazenamento de energia intermitente proveniente de fontes renováveis. Em períodos de alta produção solar ou eólica, o excedente de eletricidade pode ser utilizado para produzir hidrogênio, que posteriormente pode ser reconvertido em energia elétrica ou utilizado em processos industriais e transportes. Dessa forma, o hidrogênio verde atua como um elo fundamental entre diferentes

formas de energia limpa, promovendo uma matriz energética mais equilibrada e resiliente. (COSTA, 2023).

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia adotada no presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem descritiva e exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica. Essa escolha metodológica justifica-se pela necessidade de compreender e interpretar os princípios físicos envolvidos na geração de energia solar, eólica e do hidrogênio verde, bem como analisar suas potencialidades como fontes de energia limpa no contexto atual da transição energética.

A pesquisa é classificada como qualitativa por tratar de conceitos físicos, processos de conversão de energia e características tecnológicas, priorizando análises interpretativas em detrimento de métodos quantitativos ou experimentais (GIL, 2019). Apresenta também caráter descritivo, uma vez que busca descrever os fenômenos naturais associados à geração de energia, o funcionamento das tecnologias de captação e conversão e os fundamentos físicos que regem essas fontes energéticas. Além disso, possui caráter exploratório, pois visa ampliar o entendimento sobre o papel das energias renováveis frente aos desafios ambientais e energéticos globais (RIO ENERGY, 2025).

O desenvolvimento da pesquisa ocorreu por meio de revisão bibliográfica, utilizando-se como fontes artigos científicos publicados em bases de dados reconhecidas, como Google Acadêmico, além de livros das áreas de Física, Energias Renováveis e Tecnologias de Conversão Energética. Também foram analisados relatórios técnicos e institucionais de organismos nacionais e internacionais, tais como a Agência Internacional de Energia (IEA), a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), bem como normas, diretrizes e documentos oficiais relacionados à energia limpa e à sustentabilidade. Os critérios adotados para a seleção das fontes incluíram a priorização de publicações dos últimos dez anos, sempre que possível, a relevância científica e técnica dos materiais e a aderência dos conteúdos aos fenômenos físicos e às aplicações das fontes de energia estudadas. A análise do material bibliográfico foi realizada por meio de leitura crítica e sistematização dos conteúdos, com identificação dos conceitos centrais, permitindo a comparação entre a energia solar, a energia eólica e o hidrogênio verde quanto à eficiência, vantagens, limitações, custos e possibilidades de aplicação (GIL, 2019).

Os dados obtidos foram organizados de forma temática, seguindo a estrutura do trabalho, de modo a possibilitar uma análise integrada das potencialidades dessas fontes energéticas no contexto da transição para uma matriz mais sustentável. Ressalta-se que este estudo se limita ao campo teórico, não contemplando a realização de experimentos práticos ou medições laboratoriais. Os conteúdos abordados concentram-se nos fenômenos físicos associados a cada fonte de energia, nas tecnologias de captação e conversão disponíveis e no papel dessas energias na mitigação dos impactos ambientais e na promoção de uma matriz energética limpa (IRENA, 2023).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos materiais selecionados por meio da revisão bibliográfica evidencia que as fontes de energia solar, eólica e o hidrogênio verde apresentam elevado potencial para a diversificação da matriz energética e para a redução dos impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis. Os resultados obtidos permitem compreender os fundamentos físicos dessas fontes, bem como suas aplicações tecnológicas, vantagens e limitações no contexto atual da transição energética global (IEA, 2023).

No que se refere à energia solar, os estudos analisados indicam que essa fonte se destaca pela ampla disponibilidade da radiação solar e pelo avanço tecnológico dos sistemas fotovoltaicos e térmicos. O efeito fotoelétrico, princípio físico fundamental para a conversão da energia solar em energia elétrica, possibilita a geração de eletricidade de forma direta e com baixo impacto ambiental (EINSTEIN, 1905; VILLALVA; GAZOLI, 2012). Entretanto, os resultados também apontam limitações relacionadas à intermitência da radiação solar e à dependência de condições climáticas, o que demanda a utilização de sistemas de armazenamento ou a integração com outras fontes energéticas. Apesar dessas limitações, a redução dos custos de instalação e o aumento da eficiência dos painéis solares têm ampliado significativamente sua viabilidade econômica e sua aplicação em diferentes escalas (EPE, 2022).

Em relação à energia eólica, os resultados demonstram que essa fonte apresenta elevada eficiência na conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica, especialmente em regiões com regimes de ventos constantes. O funcionamento dos aerogeradores baseia-se na transformação da energia mecânica em energia elétrica por meio de princípios eletromagnéticos, o que torna essa tecnologia consolidada e amplamente utilizada (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2010). No entanto, a análise dos estudos revela desafios associados à variabilidade dos ventos, aos impactos visuais e sonoros e à necessidade de planejamento adequado para a implantação dos parques eólicos. Ainda assim, a energia eólica contribui de forma significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o fortalecimento de uma matriz energética mais limpa (IRENA, 2023).

Quanto ao hidrogênio verde, os resultados indicam que essa fonte energética apresenta grande potencial estratégico, sobretudo como vetor de armazenamento e transporte de energia. Produzido a partir da eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, o hidrogênio verde destaca-se por não emitir poluentes em seu uso final,

contribuindo para a descarbonização de setores de difícil eletrificação, como a indústria pesada e o transporte de longa distância (IEA, 2022). Todavia, os estudos analisados apontam que os principais desafios dessa tecnologia estão relacionados aos elevados custos de produção, armazenamento e infraestrutura. Apesar dessas limitações, o hidrogênio verde surge como uma alternativa promissora para a consolidação de uma matriz energética sustentável a longo prazo (IRENA, 2022).

De forma integrada, os resultados discutidos evidenciam que a energia solar, a energia eólica e o hidrogênio verde desempenham papéis complementares no processo de transição energética. A adoção dessas fontes contribui não apenas para a redução dos impactos ambientais, mas também para a diversificação da matriz energética, promovendo maior segurança energética e sustentabilidade no cenário global (EPE, 2022; IEA, 2023).

#### **4.1 Energia Solar**

A energia solar é uma das fontes renováveis mais promissoras no contexto da transição energética global, devido à sua abundância, baixo impacto ambiental e capacidade de geração descentralizada. Trata-se da energia proveniente da radiação emitida pelo Sol, que pode ser convertida em eletricidade ou calor por meio de diferentes tecnologias. A energia solar se destaca por ser limpa, silenciosa e capaz de reduzir emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Além disso, sua disponibilidade é praticamente inesgotável em escala humana, o que a torna uma alternativa estratégica para ampliar a matriz energética mundial. (CRESESB, 2020; IEA, 2023).

No Brasil, a energia solar tem ganhado grande relevância nos últimos anos devido às condições climáticas favoráveis e ao avanço das tecnologias fotovoltaicas. O país apresenta altos índices de irradiação solar, o que permite a instalação de sistemas eficientes tanto em grandes usinas solares quanto em sistemas residenciais de geração distribuída. A queda no custo dos equipamentos fotovoltaicos e os incentivos regulatórios têm impulsionado a expansão dessa fonte no mercado nacional. (EPE, 2022; ANEEL, 2023).

Além da geração elétrica, a energia solar também é amplamente utilizada para aquecimento de água em residências, indústrias e estabelecimentos comerciais. Essa aplicação térmica contribui para a redução do consumo energético e dos custos operacionais, tornando o aproveitamento da energia solar ainda mais versátil. Assim, suas aplicações abrangem desde

sistemas simples até tecnologias de alta eficiência presentes em grandes estruturas. (PEREIRA et al., 2017; ABENS, 2021).

#### **4.1.1 Tecnologias de captação e conversão**

A energia solar destaca-se como uma das principais fontes de energia limpa e renovável utilizadas na atualidade, sendo obtida a partir da radiação emitida pelo Sol. A tecnologia de captação e conversão dessa energia baseia-se em sistemas capazes de transformar a radiação solar em energia elétrica ou térmica de forma eficiente e sustentável, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a redução dos impactos ambientais associados ao uso de fontes fósseis (ANEEL, 2023).

As tecnologias de captação e conversão da energia solar podem ser classificadas, de forma geral, em dois grandes grupos: as tecnologias fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da luz solar diretamente em energia elétrica, e as tecnologias solares térmicas, que realizam a conversão da radiação solar em energia térmica. A escolha entre essas tecnologias depende do tipo de aplicação desejada, das condições climáticas locais e da escala de utilização do sistema (IRENA, 2021).

A tecnologia fotovoltaica é a mais difundida atualmente, sendo baseada no uso de células solares feitas de materiais semicondutores, como o silício. Quando a luz solar incide sobre essas células, ocorre o efeito fotovoltaico, gerando corrente elétrica. Os módulos fotovoltaicos podem ser instalados em telhados, fachadas ou em grandes parques solares. Entre suas vantagens estão a modularidade, a baixa manutenção e a capacidade de gerar energia mesmo em locais remotos. (SOUSA, 2025).

Figura 3- Tecnologia Fotovoltaica

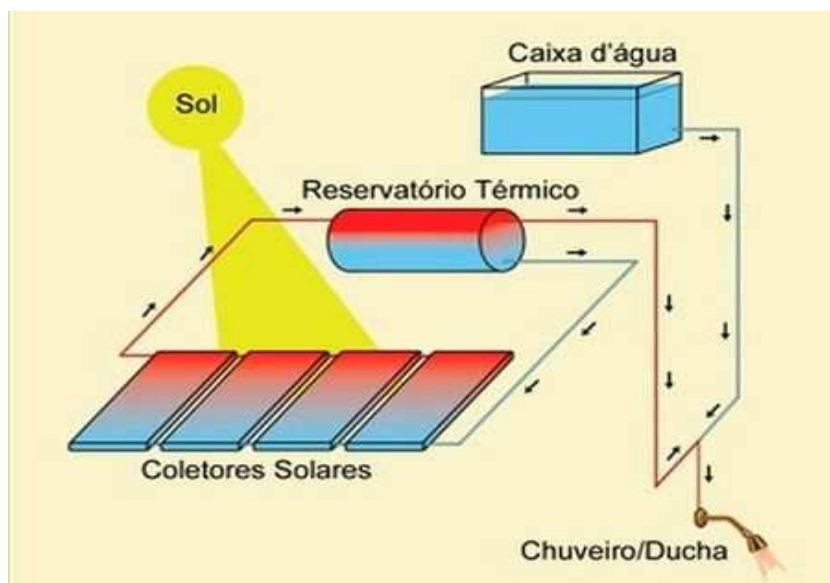


Fonte: Site SOUSA, 2025.

Nos sistemas fotovoltaicos, o funcionamento ocorre por meio do efeito fotovoltaico, fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade. Quando fótons provenientes da radiação solar atingem o material semicondutor das células fotovoltaicas — geralmente silício — eles transferem energia para os elétrons, fazendo com que se movimentem e gerem corrente elétrica. Essa corrente é então conduzida para um inversor, que transforma a energia em corrente alternada utilizada em residências, indústrias ou enviada à rede elétrica. (USP,2026)

Já as tecnologias solares térmicas concentram ou absorvem a radiação solar para produzir calor, que pode ser utilizado diretamente ou convertido em eletricidade por meio de turbinas a vapor. Entre essas tecnologias estão os coletores solares planos, utilizados principalmente para aquecimento de água, e os sistemas de concentração solar (CSP), que empregam espelhos para concentrar a luz em um ponto focal. Essas soluções são eficientes em regiões de alta irradiação direta e têm grande potencial para aplicações industriais. (NREL, 2020; EUA, 2025).

Figura 4- Sistema solar térmicos



Fonte: site do Aquebem, 2025

Nos sistemas solares térmicos, a radiação solar é convertida em energia térmica por meio de coletores que absorvem o calor e o transferem para um fluido térmico. Essa energia pode ser utilizada para aquecimento de água, ambientes ou em processos industriais, contribuindo para a redução do consumo de combustíveis fósseis (KALOGIROU, 2014).

A conversão da energia solar fotovoltaica ocorre com o auxílio de inversores, que transformam a corrente contínua gerada pelas células solares em corrente alternada, compatível com a rede elétrica convencional. Em sistemas solares térmicos de grande porte, o calor captado é utilizado para gerar vapor, que aciona turbinas conectadas a geradores elétricos, convertendo energia térmica em energia elétrica (CRESESB, 2025).

Por fim, o funcionamento da energia solar é contínuo e silencioso, não havendo emissões de poluentes durante a operação. Além disso, tecnologias modernas incluem dispositivos de monitoramento, rastreamento solar e sistemas híbridos que combinam geração elétrica e térmica, permitindo maior eficiência e aproveitamento do recurso solar. Esses avanços reforçam o papel estratégico da energia solar como uma das principais alternativas para a diversificação e sustentabilidade da matriz energética global.

#### 4.1.2 Vantagens e desafios

A energia solar apresenta diversas vantagens que a colocam entre as fontes renováveis mais promissoras do cenário energético mundial. Uma das principais vantagens é a abundância da radiação solar, um recurso inesgotável em escala humana e disponível em praticamente todas as regiões do planeta. Além disso, os sistemas fotovoltaicos possuem baixa emissão de gases de efeito estufa durante sua operação, contribuindo significativamente para a redução dos impactos ambientais associados à geração de energia elétrica. Outro aspecto positivo é a modularidade das tecnologias solares, que permite sua aplicação em diferentes escalas — desde pequenos sistemas residenciais até grandes usinas solares. (CRESESB, 2023; EPE, 2022).

Outra vantagem relevante está relacionada à descentralização da geração elétrica. A instalação de painéis solares em residências, comércios e indústrias possibilita a produção local de energia, reduzindo perdas em longas linhas de transmissão e aumentando a segurança energética. Além disso, a energia solar fotovoltaica apresenta custos de manutenção relativamente baixos e uma vida útil que pode ultrapassar 25 anos, tornando-se economicamente atrativa a médio e longo prazo. (ANEEL, 2023; IEA, 2022).

Apesar de suas vantagens, a energia solar também apresenta desafios técnicos e econômicos que precisam ser considerados. Um dos principais é a intermitência, já que a geração depende da radiação solar, variando conforme a hora do dia, clima e estações do ano. Essa característica exige soluções como sistemas de armazenamento (baterias) ou integração com outras fontes de energia para garantir estabilidade no fornecimento elétrico. (IEA, 2023; PEREIRA et al., 2017).

Do ponto de vista econômico, o investimento inicial ainda pode ser um obstáculo, especialmente em regiões de menor incentivo governamental ou para famílias de baixa renda. Embora os custos dos módulos fotovoltaicos tenham reduzido significativamente na última década, a instalação completa do sistema ainda exige capital considerável. Outros desafios incluem a necessidade de áreas amplas para instalação de grandes usinas solares, impactos ambientais relacionados ao descarte de módulos no fim da vida útil e a limitação da eficiência dos painéis, que ainda está em constante desenvolvimento tecnológico. (EPE, 2021; NREL, 2020).

## **4.2 ENERGIA EÓLICA**

A energia eólica é gerada a partir da conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica, utilizando aerogeradores capazes de captar e transformar o movimento do ar em eletricidade. Essa fonte renovável destaca-se por ser limpa, abundante e apresentar menor impacto ambiental quando comparada às fontes fósseis tradicionais. A origem dos ventos está diretamente relacionada ao aquecimento desigual da superfície terrestre pelo Sol, criando diferenças de pressão atmosférica que impulsionam massas de ar. (ANEEL, 2023).

No Brasil, a energia eólica tem grande relevância devido à excelente qualidade dos ventos, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, onde a constância e intensidade proporcionam altos fatores de capacidade. Essa condição favorece a viabilidade econômica dos parques eólicos e contribui para a expansão dessa fonte na matriz elétrica nacional. Além disso, avanços tecnológicos têm reduzido custos e ampliado a eficiência dos aerogeradores, tornando a energia eólica uma das mais competitivas do país. (EPE, 2022).

#### **4.2.1 Tipos de turbinas eólicas**

As turbinas eólicas, também chamadas de aerogeradores, são dispositivos responsáveis por captar a energia do vento e convertê-la em energia elétrica. Elas podem ser classificadas de acordo com o tipo de eixo, o número de pás e o local de instalação. Essas características influenciam diretamente a eficiência, o desempenho aerodinâmico e a aplicação mais adequada de cada tecnologia. (MANWELL; ROGERS, 2019).

Nessa esteira, as turbinas de eixo horizontal (TEH) são as mais utilizadas em projetos comerciais, caracterizadas por um rotor orientado na direção do vento. Elas possuem alta eficiência e são empregadas principalmente em parques eólicos de grande porte. Modelos modernos podem ultrapassar 5 MW em instalações terrestres e até 12 MW em parques offshore. Seu funcionamento depende de sistemas de orientação (yaw) e pás projetadas para otimizar o aproveitamento aerodinâmico do vento. (BURTON et al. 2021).

Assim, as turbinas de eixo vertical (TEV) possuem o rotor perpendicular ao solo, permitindo captar ventos de qualquer direção sem necessidade de mecanismos de orientação. Entre os modelos mais comuns estão o Darrieus, mais eficiente e utilizado em aplicações de porte médio, e o Savonius, que apresenta menor eficiência, sendo empregado em projetos de pequena potência. Embora não alcancem a eficiência das turbinas de eixo horizontal, são vantajosas em ambientes urbanos ou locais com turbulência elevada. (MATHEW, 2006).

Por fim, as turbinas offshore são instaladas no mar e aproveitam ventos mais fortes e constantes, oferecendo maior potencial de geração. Essas turbinas utilizam torres mais altas,

pás maiores e estruturas resistentes à corrosão e ao ambiente marítimo. Apesar dos custos elevados de instalação e manutenção, apresentam grande capacidade instalada e menor impacto visual e sonoro para populações próximas. (GWEC, 2023).

#### **4.2.2 Potencial e limitações**

O potencial da energia eólica decorre da abundância dos ventos e da capacidade de conversão da energia cinética do ar em eletricidade limpa. Em muitas regiões do mundo, incluindo o Brasil, os regimes de vento são constantes e apresentam alta velocidade média anual, tornando esta fonte especialmente eficiente. Estudos apontam que o Nordeste brasileiro possui um dos maiores fatores de capacidade do planeta, ultrapassando 50% em alguns parques, valor significativamente superior ao observado em países europeus. Esse alto potencial reduz custos, melhora a previsibilidade de geração e fortalece a segurança energética. (ANEEL, 2023).

Além de sua abundância natural, a energia eólica apresenta crescimento acelerado devido à maturidade tecnológica e à redução dos custos de instalação. A expansão de turbinas de grande porte e de aerogeradores offshore aumenta ainda mais o potencial de exploração, pois permite a captura de ventos mais fortes e estáveis no mar. Com isso, a energia eólica tornou-se uma das fontes renováveis mais competitivas, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. (IEA, 2022).

No entanto, mesmo com grande potencial, a energia eólica apresenta limitações que precisam ser consideradas. A principal delas é a intermitência, uma vez que a velocidade dos ventos varia ao longo do dia e das estações, exigindo sistemas de armazenamento ou complementação por outras fontes para garantir estabilidade no fornecimento. Essa oscilação natural pode impactar a operação do sistema elétrico, aumentando a necessidade de planejamento e de redes inteligentes. (EPE, 2023).

Outra limitação envolve impactos ambientais e sociais associados à instalação dos parques eólicos. Em áreas terrestres, os aerogeradores podem gerar ruído, alterar a paisagem e interferir na fauna, especialmente aves e morcegos. Já em ambientes costeiros e marítimos, podem surgir conflitos com atividades como pesca e navegação. Além disso, processos de licenciamento podem se tornar demorados quando há comunidades próximas ou áreas de preservação ambiental. Mesmo assim, quando bem planejada, a energia eólica apresenta impactos significativamente menores em comparação a fontes fósseis. (PENA, 2025)

Por fim, aspectos técnicos e logísticos também impõem limitações ao avanço dessa fonte. A instalação e o transporte de equipamentos, especialmente turbinas de grande porte, exigem infraestrutura adequada e vias preparadas, o que pode aumentar custos em regiões remotas. Da mesma forma, a integração da energia eólica ao sistema elétrico demanda investimentos em linhas de transmissão, subestações e sistemas de controle. Apesar desses desafios, o avanço contínuo da tecnologia tem reduzido custos e ampliado a viabilidade desse tipo de geração. (PENA,2025).

## **4.3 HIDROGÊNIO VERDE**

### **4.3.1 Produção, armazenamento e aplicações**

A produção de hidrogênio verde baseia-se na eletrólise da água, um processo em que a molécula de  $H_2O$  é separada em hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) por meio da aplicação de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica. A principal vantagem desse método é que ele não gera emissões de dióxido de carbono durante sua operação, diferentemente do hidrogênio cinza ou azul, que dependem de combustíveis fósseis. Assim, o hidrogênio verde se destaca como um vetor energético limpo, compatível com os objetivos de descarbonização global. (REN21, 2023).

O armazenamento do hidrogênio verde é um dos principais desafios tecnológicos, pois o gás possui baixa densidade energética em condições normais. As formas mais comuns incluem o armazenamento em alta pressão (entre 350 e 700 bar), o armazenamento criogênico em estado líquido a aproximadamente  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e o armazenamento em materiais sólidos, como hidretos metálicos e estruturas porosas. Cada método apresenta vantagens e limitações envolvendo custo, eficiência e segurança, sendo a escolha dependente das necessidades de transporte e uso final. (IEA, 2022).

Em termos de aplicações, o hidrogênio verde possui grande potencial para setores difíceis de descarbonizar. Na indústria, pode substituir o carvão na produção de aço via redução direta do minério de ferro, além de ser utilizado na síntese de amônia e metanol com menor impacto ambiental. No setor de transportes, o hidrogênio é empregado em veículos elétricos com célula a combustível, especialmente em transportes pesados como caminhões, trens e navios, onde baterias convencionais têm limitações de autonomia. Também pode ser usado para armazenamento sazonal de energia, auxiliando na estabilidade de sistemas

elétricos com grande participação de fontes intermitentes como a solar e a eólica. (IRENA, 2023).

O hidrogênio verde também pode desempenhar papel estratégico na integração energética entre países, permitindo a exportação de energia renovável na forma de hidrogênio ou derivados, como amônia verde e combustíveis sintéticos. Países com alto potencial de geração solar e eólica, como o Brasil, destacam-se como potenciais exportadores. Esse cenário abre oportunidades econômicas, ao mesmo tempo em que contribui para a transição energética global e o cumprimento das metas climáticas internacionais. (EPE, 2024).

#### **4.3.2 Perspectivas e Desafios**

As perspectivas para o hidrogênio verde são amplas e promissoras, especialmente diante da necessidade global de descarbonização e da ampliação das fontes de energia limpa. Países como Alemanha, Japão e Estados Unidos têm investido em políticas de incentivo e metas de expansão da produção, reconhecendo o potencial do hidrogênio para substituir combustíveis fósseis em setores de difícil eletrificação, como siderurgia, transporte pesado e indústria química. Essa tendência indica que o hidrogênio verde tende a se consolidar como um vetor energético estratégico nas próximas décadas. (IEA, 2023).

Outro ponto favorável é o avanço tecnológico na área de eletrólise e no desenvolvimento de energias renováveis, que reduz continuamente o custo de produção do hidrogênio verde. A ampliação da geração solar e eólica, especialmente em países com grande potencial renovável como o Brasil, favorece a competitividade do hidrogênio de baixo carbono. Além disso, grandes empresas do setor energético têm demonstrado interesse em projetos de larga escala, o que pode acelerar a maturidade tecnológica e comercial do hidrogênio verde. (IRENA, 2022; EPE, 2023).

Entretanto, os desafios ainda são significativos. O primeiro deles é o elevado custo de produção, que permanece superior ao do hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis. Esse aspecto dificulta a competitividade em mercados sensíveis a preço e exige incentivos governamentais, subsídios ou mecanismos regulatórios que favoreçam alternativas sustentáveis. Outro obstáculo está na necessidade de ampliar a infraestrutura de transporte, distribuição e armazenamento, que ainda é limitada e demanda altos investimentos. (WORLD BANK, 2023; HYDROGEN COUNCIL, 2022).

Há também desafios relacionados à segurança e ao desenvolvimento de normas técnicas. O hidrogênio é um gás altamente inflamável e exige sistemas de armazenamento e manuseio específicos, o que requer regulamentação adequada, capacitação profissional e infraestrutura robusta. Além disso, a aceitação social e o desconhecimento do público sobre o hidrogênio podem dificultar a implantação de projetos, especialmente em áreas urbanas e portuárias. (ISO, 2021)

Por fim, a consolidação do hidrogênio verde depende de políticas públicas de longo prazo, parcerias entre governos e empresas, investimentos em pesquisa e desenvolvimento e da integração com outras tecnologias renováveis. Caso esses desafios sejam superados, o hidrogênio verde tende a desempenhar um papel central na transição energética global, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a construção de um sistema energético mais sustentável e resiliente. (IEA, 2023; IRENA, 2023).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As discussões apresentadas ao longo deste trabalho permitiram compreender a relevância crescente das fontes de energia limpa no cenário energético contemporâneo, destacando especialmente a energia solar, a energia eólica e o hidrogênio verde. Em um contexto de intensificação das mudanças climáticas e da urgência por alternativas sustentáveis, essas tecnologias se mostram essenciais para a transição energética global. A análise realizada evidencia que a energia solar e a energia eólica já representam soluções consolidadas, com ampla aplicação e crescente competitividade econômica. Ambas se beneficiam do avanço tecnológico, que tem ampliado sua eficiência, reduzido custos e favorecido sua integração às matrizes energéticas de diversos países, incluindo o Brasil. Paralelamente, o hidrogênio verde surge como uma alternativa estratégica para setores de difícil descarbonização, oferecendo um caminho promissor para alcançar neutralidade de carbono em médio e longo prazo.

A partir da revisão bibliográfica e dos fundamentos físicos estudados, ficou claro que cada uma dessas fontes possui características distintas, mas complementares. A combinação entre elas possibilita maior segurança energética, diversificação da matriz e redução significativa de impactos ambientais. Conclui-se, portanto, que investir em energias renováveis não é apenas uma necessidade ambiental, mas também uma oportunidade econômica e social.

O futuro da energia depende do desenvolvimento contínuo dessas tecnologias, do fortalecimento de políticas públicas e da conscientização coletiva sobre a importância da sustentabilidade. Assim, espera-se que este trabalho contribua para o entendimento das potencialidades das energias limpas e incentive novas reflexões e estudos sobre o tema.



## REFERÊNCIAS

ABENS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar. Disponível em: < <https://www.abens.org.br/>>. Acesso em: 3 jan. 2026.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: [https://www.fisica.net/energia/atlas\\_de\\_energia\\_eletrica\\_do\\_brasul\\_3a-ed.pdf](https://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasul_3a-ed.pdf). Acesso em: 21 set. 2025.

AQUEBEM. Energia solar térmica – aquecedor. Disponível em: < <https://www.aquebem.com.br/energia-solar>>. Acesso em: 21 set. 2025.

BEZERRA, F. H.; SANTOS, J. R. Geração de energia eólica: fundamentos, aplicações e impactos. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 12, n. 3, p. 45–62, 2022. Disponível em: [https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/51890/1/](https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/51890/1/JARDEL_BEZERRA_GON%C3%87ALVES.pdf)

JARDEL\_BEZERRA\_GON%C3%87ALVES.pdf. Acesso em: 22 set. 2025

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 26 out. 2025

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Energia solar fotovoltaica no Brasil: perspectivas e análises. Brasília: MME/EPE, 2022. Disponível: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2022\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf). Acesso em: 15 set. 2025

BRASILESCOLA. Fontes renováveis de energia. Disponível em: < <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/fontes-renovaveis-energia.htm> >. Acesso em: 21 dez. 2025.

CANAL SOLAR. Canal Solar: notícias e artigos sobre energia solar. Disponível em: < <https://canalsolar.com.br/> >. Acesso em: 21 dez. 2025.

CAVALCANTE, L. M.; PEREIRA, E. P. Hidrogênio verde: fundamentos, produção e aplicações. Revista Engenharia Sustentável, v. 9, n. 2, p. 15–34, 2023. Disponível em: <https://engemasp.submissao.com.br/26/arquivos/318.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025

COSTA, L. F. Economia do hidrogênio e o armazenamento de energia renovável. Rio de Janeiro: Elsevier, 2023. Disponível em: <https://opencadd.com.br/>. Acesso em 15 out. 2025

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Disponível em: <<https://cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 3 jan. 2026.

ECHO ENERGIA. Como é produzida. Disponível em: <<https://echoenergia.com.br/blog/como-e-produzida-e-distribuida-a-energia-eolica/>>. Acesso em: 21 dez. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2023: ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 20 out. 2025

ERBER, P. Transição energética e desenvolvimento sustentável. São Paulo: Editora XYZ, 2025. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2025/04/Artigo-Pietro-Erber-31.03.2025.pdf>. Acesso em 22 out. 2025

EUA. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Concentrating solar-thermal power. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power>>. Acesso em: 3 jan. 2025.

FOSTER, R. et al. Solar energy: renewable energy and the environment. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021. Disponível em: <https://abdulkadir.blog.uma.ac.id/wp-content/uploads/sites/445/2019/09/Solar-energy-Renewable-Energy-and-the-Environment.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2025

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind Report 2023. Disponível em: <<https://www.gwec.net>>. Acesso em: 5 dez. 2025.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física: volume 2 – gravitação, ondas e termodinâmica. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Hydrogen Review 2023. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.gwec.net/gwec-news/strong-2023-offshore-wind-growth>. Acesso em: 23 dez. 2025

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewables 2023: analysis and forecast to 2028. Paris: IEA, 2023. Disponível em: [https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2024/08/Renewables\\_2023.pdf](https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2024/08/Renewables_2023.pdf). Acesso em: 23 dez. 2025

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Energias renováveis e transição energética no Brasil. Brasília: IPEA, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstreams/ea4a7b6-258a-48b8-abfe-0afd287911cc/download>. Acesso em: 23 dez. 2025

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Geneva: IPCC, 2022. Disponível em: [https://report.ipcc.ch/ar6/wg3/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_Full\\_Report.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg3/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf). Acesso em: 26 dez. 2025

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: 24 dez. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). Annual Report 2021. Genebra: ISO, 2021. Disponível em: <https://www.iso.org/ar2021.html>. Acesso em: 12 jan. 2026.

JUNQUEIRA, R. G.; TAVARES, C. S. Energias renováveis: fundamentos e aplicações. São Paulo: LTC, 2021. Disponível em: <https://www.martinsfontespaulista.com.br/energias-renovaveis--geracao-distribuida-e-eficiencia-energetica-1117715/p>. Acesso em: 24 dez. 2025

KALOGIROU, S. A. Solar energy engineering: processes and systems. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2014. Disponível em: <<https://pdfroom.com/books/solar-energy-engineering-processes-and-systems/PXn2G9NOdxV>>. Acesso em: 3 jan. 2026.

KANH ACADEMY. Photoelectric effect: work function, disponível em: <https://www.khanacademy.org/a/photoelectric-effect>. Acesso em: 6 dez. 2025

LIMA, J. R. Hidrogênio verde: fundamentos, tecnologias de produção e aplicações energéticas. São Paulo: Blucher, 2022. Disponível em:

<https://fatecpiracicaba.edu.br/revista/index.php/bioenergiaemrevista/article/viewFile/480/pdf>.

Acesso em: 28 dez 2025

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. Wind energy explained: theory, design and application. 3. ed. Chichester: Wiley, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Veera-Manikandan/post/The\\_most\\_recommended\\_book\\_on\\_wind\\_energy/attachment/62e0e8050c295f1f9acdd8af/AS](https://www.researchgate.net/profile/Veera-Manikandan/post/The_most_recommended_book_on_wind_energy/attachment/62e0e8050c295f1f9acdd8af/AS%3A1182354253053952%401658906629419/download/wind%2Benergy-book.pdf)

[%3A1182354253053952%401658906629419/download/wind%2Benergy-book.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Veera-Manikandan/post/The_most_recommended_book_on_wind_energy/attachment/62e0e8050c295f1f9acdd8af/AS%3A1182354253053952%401658906629419/download/wind%2Benergy-book.pdf). Acesso em: 20 out. 2025

NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Renewable energy potential. Disponível em: < <https://www.nrel.gov/gis/renewable-energy-potential.html> >.

Acesso em: 20 nov. 2025.

OLIVEIRA, M. A. Desafios econômicos e perspectivas do hidrogênio verde na transição energética. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 2, p. 45–62, 2023. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/view/71>. Acesso em: 21 nov. 2025

PEREIRA, E. B. et al. Atlas brasileiro de energia solar. 3. ed. São José dos Campos: INPE, 2022. Disponível em:

[https://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas\\_Brasileiro\\_Energia\\_Solar\\_2a\\_Edicao\\_rev-01-compactado.pdf](https://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_rev-01-compactado.pdf). Acesso em: 20 nov. 2025

REN21. Renewables 2023 Global Status Report. Disponível em: < [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023\\_GlobalOverview\\_Full\\_Report\\_with\\_endnotes\\_web.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf) >.

Acesso em: 25 dez. 2025.

RIO ENERGY. Rio Energy. Disponível em: < <https://www.rioenergy.com.br/> >. Acesso em: 21 dez. 2025.

RUBIO, M. F. Energia eólica: conceitos, aplicações e desafios. São Paulo: Érica, 2020. Disponível em:

<https://www.sibi.ufscar.br/espacodopesquisador/porondecomecar/catalogo-pergamum>. Acesso em: 28 nov. 2025

SACHS, I. Caminhos para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Garamond, 2019. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/86025525/Caminhos-para-o-desenvolvimento-sustentavel-SACHS-Ignacy-2000>. Acesso em: 28 nov. 2025

SILVA, L. F.; COSTA, P. R. A transição energética e o papel do hidrogênio verde no desenvolvimento sustentável. *Revista de Tecnologia e Sociedade*, v. 18, n. 4, p. 210–228, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 2 dez. 2025

SOUSA, R. Energia solar. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/energia-solar.htm>. Acesso em: 22 dez. 2025.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para cientistas e engenheiros. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. Disponível em: <https://drivedepobre.com/arquivo/1f7c4ca863>. Acesso em: 4 dez. 2025

TURNER, J. A. A realizable renewable energy future. *Science*, Washington, v. 305, n. 5686, p. 972–974, 2004. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/12872590\\_A\\_Realizable\\_Renewable\\_Energy\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/12872590_A_Realizable_Renewable_Energy_Future). Acesso em: 15 nov. 2025

UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Efeito fotoelétrico. Disponível em: < <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12663/000631479.pdf?isAllowed=y&sequence=1> >. Acesso em: 21 dez. 2025.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Climate Change Mitigation Report 2022. Bonn: UNFCCC, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 7 nov. 2025

USP – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Energia e Ambiente. Sistema fotovoltaico: o que é e como funciona na prática. Disponível em: < <https://www.iee.usp.br/noticia/sistema-fotovoltaico-o-que-e-e-como-funciona-na-pratica/> >. Acesso em: 3 jan. 2026.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Our common future. Oxford: Oxford University Press, 1987. Disponível em: <https://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025

WWF-BRASIL. Governos e petroleiras começam a corrida pelo mercado de hidrogênio verde. WWF Brasil, 23 jan. 2023. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?84740/governos-e-petroleiras-comecam-corrida-pelo-mercado-de-hidrogenio-verde>. Acesso em: 5 nov. 2025.