



VOLUME 3

Energias renováveis e sua integração no H₂ Verde

PAULO SMITH SCHNEIDER, DAVI GABRIEL LOPES,
JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES, AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

Energias renováveis e sua integração no H₂ Verde

Projeto H2Brasil – Expansão do Hidrogênio Verde

Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável (Componente 03 – Capacitação)

Implementação: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)

- Diretor: Markus Francke
- Coordenador: Martin Studte

Coordenação Geral: INTEGRATION / GOPA_INTEC

- Coordenação: Klaus-Peter Albrechtsen
- Especialista: Lothar Hoppe
- Especialista: Rosana Z. Domingues
- Tradução: Francisco Polatscheck
- Revisão: Victor N. Bistrizki

Coordenação dos Cursos e Livros: Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética

- Coordenação Geral dos cursos: Júlia Teixeira Fernandes
- Coordenação Acadêmica: Aurélio Lamare Soares Murta
- Coordenação Operacional: Roney Ramaiano de Souza Silva
- Coordenação Pedagógica: Ariane Louzada Sasso Ferrão
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Bianca Zorzetto Carniel Furquim
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Isabelle Freire Sousa

Energias renováveis e sua integração no H₂Verde

Ficha catalográfica

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Energias renováveis e sua integração no H₂Verde
[livro eletrônico]:volume 3/Paulo Smith
Schneider...[et al].-- Brasília,DF: LaSUS FAU,
2023(Coleção 1:conceitos do H₂ power-to-x)
PDF

Outros autores: Davi Gabriel Lopes, Júlia
Teixeira Fernandes, Aurélio Lamares Soares Murta.
Bibliografia.

ISBN 978-65-84854-26-0

1. Carbono 2. Energia - Fontes alternativas 3. Fontes
renováveis 4. Transição Energética - Brasil
5. Hidrogênio Verde

I. Série.

23-178140

CDD-333.794

Índices para catálogo sistemático:

1. Brasil : Energias renováveis : Desenvolvimento
sustentável : Economia 333.794

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

Dados editoriais:

Editora: LaSUS FAU UnB

Equipe editorial:

- Professor Dr. Caio Frederico e Silva (ed)
- Professora Dra. Marta Bustos Romero(ed)
- Coordenador Técnico: Valmor Cerqueira Pazos



UnB Estante digital: <https://livros.unb.br/>

Energias renováveis e sua integração no H₂ Verde*



*Esse livro tem como referência a transcrição e adaptação das aulas do Curso 1-Modulo 3, H₂Brasil, 2023.

Conteúdo das aulas:

PAULO SMITH SCHNEIDER

DAVI GABRIEL LOPES

Adaptação para livro:

JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES

AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

Organização do livro:

KLAUS-PETER ALBRECHTSEN

LOTHAR HOPPE

ROSANA ZACARIAS DOMINGUES

Energias renováveis e sua integração no H₂ Verde

Dr. Paulo Smith Schneider

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) | pss@mecanica.ufrgs.br

Graduação e mestrado em Engenharia Mecânica pela UFRGS, e doutorado em Engenharia pelo *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon- INSA*, França, pós-doc na *The University of Queensland*, UQ, Austrália. É professor titular e pesquisas nas áreas: alternativas voltadas à transição energética, aplicações de hidrogênio verde, armazenamento de energia, racionalização energética e integração de sistemas de energia complexos; concepção, desenvolvimento, modelagem e análise de sistemas e equipamentos térmicos e de conversão de potência; análise e otimização termodinâmica de sistemas convencionais e alternativos, sistema reativos, aproveitamento energético de resíduos, desenvolvimento de equipamentos para recuperação de correntes de baixa disponibilidade energética, sistemas de acumulação de energia.

Dr. Davi Gabriel Lopes

Universidade Estadual de Campinas (FEEC/UNICAMP) | InvestSP | engdaviropes@gmail.com

Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos pela ; Mestre em Planejamento de Sistemas de Energéticos pela UNICAMP e Graduado em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal do Ceará. Coordenador de Investimentos na INVESTSP, Consultor especialista em hidrogênio na Dglopes-Consultoria e pesquisador em hidrogênio e energia solar fotovoltaica na FEEC/UNICAMP . Atua na áreas: energia solar fotovoltaica, energia eólica, sistemas híbridos, aproveitamento da geração de hidrogênio e posterior utilização em células à combustível a partir da reforma de etanol e eletrólise, para geração distribuída e na eletromobilidade.

Dra. Júlia Teixeira Fernandes

Universidade de Brasília (UnB) e Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética | julia@quali-a.com

Arquiteta e Urbanista; Doutora pela FAU-UnB, pesquisadora no LaSUS, LACAM e SiCAC, nas áreas de Sustentabilidade, Bioclimatismo, Conforto Ambiental, Desempenho Térmico e Lumínio, Eficiência Energética, Qualidade Ambiental e Simulação Computacional. Realiza consultorias e capacitações especializadas, em especial, de Etiquetagem de Eficiência Energética das Edificações (PROCEL-EDIFICA/MME), Normas, Certificações, Neroarquitetura e Biofilia. Professora de pós do IPOG e sócia da Quali-A, implatada no Impact Hub-Brasília. Fundadora do IDB (Instituto Design Biofílico).

Dr. Aurélio Lamare Soares Murta

Universidade Federal Fluminense (UFF) | aureliomurta@id.uff.br

Graduado em Engenharia Civil, Mestrado em Transportes (IME), Doutorado e Pós-doutorado em transporte e Planejamento Energético e Ambiental UFRJ. É Professor da UFF no Mestrado e Graduação em Administração, Coordenador do MBA em Logística Empresarial, além de Pesquisador do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais/UFRJ. Membro Imortal da Academia Brasileira de Ciências, Artes, História e Literatura (ABRASCI). Áreas de atuação incluem Engenharia de Transportes, Planejamento e Operação Logística, Gerenciamento de Projetos, Pesquisa Operacional e Simulação.

Energias renováveis e sua integração no H₂ Verde

Me. Klaus-Peter Albrechtsen

Integration – International Management Consultants GmbH / GIZ | klausalbrechtsen@yahoo.de

Mestrado em Eletrotécnica de Potência e em Educação Profissional pela Universidade de Hamburgo/Alemanha. Especialista nas áreas de energias renováveis, eficiência energética, gestão de projetos, desenvolvimento organizacional, gestão e desenvolvimento de recursos humanos. Mais de 30 anos de experiência na prestação de respectivos serviços de consultoria em mais de 20 países.

Esp. Lothar Hoppe

Integration / Gopa_Intec / GIZ | lotharhoppe@outlook.com

Engenheiro eletricitista com pós-graduação em eficiência energética e gestão de energia pela PUCRS. Com vasta experiência em: consultoria e auditoria nas áreas de eficiência energética, gerenciamento de energia, economia de energia e sistemas de energia renovável, instrutor e professor em energia renovável em empresas e instituições de ensino com SENAI, PUCRS e outras. Atua nas áreas de Solar térmica, fotovoltaica, eólica, biomassa e hidrogênio.

Dra. Rosana Zacarias Domingues

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Integration/GIZ | dominguesrz@gmail.com

Doutorado pelo *Institut National Polytechnique de Grenoble*-França- INPG; Bacharel, Licenciada e Mestre em Química pela UFMG. Especialista no projeto H2Brasil BR-AL (GIZ-MME) de cursos de capacitação, coordena projetos para criação de ação de novos produtos e serviços com equipes multidisciplinares em empresas (CEMIG, EMBRAER, Magnesita etc.) nas áreas de células a combustível, biomateriais e eletroquímica. Participa dos programas de Pós-Graduação -PPGIT/UFMG.

Dr. Victor Nikolaus Bistrizki

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) | bistrizki@ufmg.br

Possui mestrado e doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2021). Tem experiência atuando principalmente nos seguintes temas: energia renovável, inovação de biotecnologias, tecnologias de hidrogênio, panorama de patentes.



Por meio da:



Apoio:



Coordenação do curso:



Energias renováveis e sua integração no H₂Verde

PAULO SMITH SCHNEIDER, DAVI GABRIEL LOPES,
JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES, AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

Brasília-DF, 2023

Objetivo do livro e proteção aos direitos autorais

Ressaltamos que o conteúdo do livro, segue uma estrutura textual de transcrição de aulas online, com formato didático e informal. A linguagem é acessível, para todos os profissionais, que estão tendo a primeira aproximação com o tema Hidrogênio Verde por meio dos cursos.

Como foram inúmeras solicitações para novas turmas, a coordenação geral dos cursos, avaliou a relevância de todo o conteúdo gerado no projeto, encarando a confecção dos 10 livros como uma oportunidade de democratizar esse conhecimento no Brasil.

Assim, a leitura desse livro, também deve ser feita com esse propósito: uma oportunidade de “ler/ouvir” esses grandes especialistas, durante uma aula sobre H₂Verde. Por isso, o objetivo do livro é ter um caráter técnico, com uma abordagem didática das informações, conteúdos e exemplos ilustrativos, de fácil compreensão, com o propósito de garantir a aprendizagem.

O livro não substitui as publicações e referências acadêmicas sobre o assunto. Para isso, sugerimos conhecer o currículo lattes, a biografia, as publicações (livros e artigos), pesquisas e trabalhos técnicos (de universidades, laboratórios e empresas), desenvolvidos pelos professores conteudistas e especialistas, que são grandes referências no tema no Brasil e mundo.

Lembramos que todo o conteúdo reunido foi fruto de uma iniciativa inédita no país. Reforçamos que todo criador de uma obra intelectual tem seu direito autoral garantido sobre a sua criação. Esse direito é exclusivo dos autores (art. 5.º, XXVII, da Constituição Federal), constitui-se de um direito moral (criação) e um direito patrimonial (pecuniário). Segundo a Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, este material está protegido pela lei de direito autoral.

Solicitamos que qualquer reprodução, parcial ou integral, seja referenciada com a devida autoria e solicitada uma autorização dos autores.

Quanto às imagens utilizadas, suas fontes estão especificadas, e alertamos que o livro não é, e não pode, ser comercializado. O conteúdo é fruto da transcrição das aulas dos professores no Projeto H₂Brasil, que tem o intuito de disseminar o conhecimento no Brasil. Seu uso é exclusivamente didático, utilizando as imagens para fins de estudo ou crítica sobre o assunto em questão.

Apresentação

O contexto mundial de transição energética para uma economia com zero emissões de carbono prioriza o uso de energias renováveis como a solar, a eólica e a hídrica em oposição as oriundas de fontes fósseis. Entretanto, um dos desafios do uso de tais fontes surge pelo fato delas serem intermitentes e não armazenáveis e, portanto, devem ser utilizados localmente ou enviadas para uma rede de distribuição.

No Brasil, a capacidade de produção de energia a partir das fontes renováveis é enorme, podendo gerar, em certos momentos, um excedente de energia. O hidrogênio, H₂, surge então como uma forma de armazenar estas energias. O H₂, que é um vetor energético, pode ser obtido através de diferentes rotas, com baixa ou nula emissão de carbono. Caso, a energia usada seja renovável, o H₂ produzido via eletrólise é denominado H₂ Verde.

Em uma de suas ações, o **Projeto H₂ Brasil Power-to-X** previu a capacitação dos futuros profissionais brasileiros que atuarão na cadeia do H₂ Verde. Como foco da **“Componente 3 do Projeto” (Educação Profissional e Superior para o Hidrogênio Verde)**, foram desenvolvidos cursos teóricos e práticos, desde a produção de H₂ até seu uso final.

O objetivo dos cursos foi abordar desde o conhecimento básico fundamental até detalhar temas mais relevantes para contexto brasileiro. O intuito é a formação de um grande grupo capacitado, que será o futuro corpo docente do tema H₂ Verde no Brasil. (Rede H₂ Brasil). O público-alvo era professores (mestres e doutores) e instrutores nas áreas correlatas ao H₂ Verde, tais como engenharia elétrica, civil, eletrotécnica, mecânica, mecatrônica, química, economia, gestão, TI, economia ou direito com experiência e conhecimento em energias renováveis ou afins.

Foram 1.176 participantes que tiveram a oportunidade de se capacitar, divididos em 11 turmas, num total de 120h de carga horária. As etapas EAD (online) abordaram desde a introdução até a aplicabilidade do H₂ Verde no mercado. Já a etapa presencial focou nos cenários regionais para implantação de tecnologias relacionadas ao H₂ Verde, por meio de visitas técnicas orientadas. Também foram ministrados 8 cursos, denominados *masterclasses*, com mais de 495 inscritos, com carga horária de 20h a 30h, no formato EAD (online).

Esse livro é produto dessas capacitações, que reuniu 23 professores doutores, em temas relacionados ao H₂ Verde. Foi uma ação, inovadora e colaborativa, na criação de conteúdos, do Brasil e Alemanha. Assim todo o material didático dos cursos (transcrição de aulas, slides e apostilas) foi compilado, resultando no desenvolvimento de 2 coleções, com total de 10 livros didáticos do projeto H₂ Brasil Power-to-X.

Expressamos nosso reconhecimento aos autores e toda equipe envolvida, pelo trabalho árduo e inédito. Esperamos que os livros possam contribuir e ampliar ações efetivas para o crescimento do H₂ Power-to-X no Brasil.

Klaus P. Albrechtsen

H₂ Brasil Power to X - Programa de Parceria Alemã-Brasileira
Componente: Formação Profissional e Superior para Hidrogênio Verde

Sumário

1. Oferta e demanda de energia.....	9
1.1 Equilíbrio de Geração x Consumo de Energia.....	9
1.2 Transição energética.....	21
1.3 Como oferta se converte em demanda?.....	22
1.4 Eletricidade e combustível.....	26
2. Acumulação de energia.....	41
2.1. Onde procurar a informação?	52
3. Matriz energética e elétrica mundial e brasileira.....	53
4. Sistema Elétrico Brasileiro (SEB).....	64
5. Organização do Setor Elétrico Brasileiro.....	74
6. Energia Solar Fotovoltaica	78
7. Energia Solar Fotovoltaica	99
8. Paleta de cores do Hidrogênio.....	109
9. Sector Coupling (Interligação Setorial).....	115
10. Considerações Finais.....	117
11. Referências.....	117

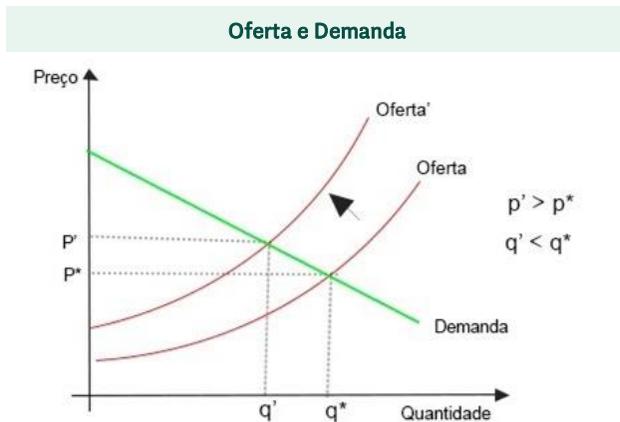
1. Oferta e demanda de energia

1.1. Equilíbrio de Geração x Consumo de Energia

Vamos iniciar nosso tema falando sobre a matriz energética e elétrica mundial, em especial a do nosso país, e como tudo isso está relacionado ao hidrogênio, mais especificamente ao Hidrogênio Verde.

Para isso, vamos abordar algumas questões fundamentais. É importante entendermos o que é o hidrogênio, onde ele se encaixa na nossa matriz energética, e seu papel como solução, e o que ele pode ou não fazer por nós.

Para começar, vamos falar sobre os conceitos de oferta e demanda de energia (Fig. 1), e explorar todos os tópicos relacionados a isso.



A oferta está em uma ponta, a demanda em outra

Figura 1: Oferta e Demanda. Fonte: Notas de aula, 2023.

Também é importante saber onde buscar informações confiáveis para que, como profissionais que desejam disseminar esse conhecimento e promover treinamentos, possamos encontrar materiais relevantes para nos mantermos atualizados. Utilizado na linguagem convencional de mercado, o preço é o que mais importa. E isso tem variação de acordo com a oferta em relação à demanda.

Mas o que é a demanda?

Basicamente, a demanda é uma quantidade solicitada ou requerida de um produto ou serviço, que terá uma oferta para satisfazê-la. As duas forças terão um ponto de equilíbrio.

No entanto, essa linguagem não se aplica somente ao mercado, nós também a utilizamos em nosso dia a dia. Quando fazemos um pedido em um restaurante ou temos necessidades, estamos produzindo demandas. Demanda também pode ser associada a uma situação instantânea e é aqui que entra a energia.

Começaremos com um pouco de matemática e física para nivelarmos nossa linguagem. Para isso, vamos considerar uma grandeza qualquer, chamada de "G". Se referenciarmos a variação dessa grandeza em relação ao tempo, ou seja, sua derivada, estamos falando de taxa. Um exemplo comum disso é a taxa de juros, que se refere à variação do dinheiro no tempo.

No entanto, em outras áreas, como a televisão, as pessoas acabam confundindo conceitos e chamando de taxa o que, na verdade, é índice. Aqui, vamos tentar restringir o uso correto da taxa (Fig. 2).

Taxas

Taxa é uma derivada de uma grandeza **G** no tempo

Se **G** = trabalho → a taxa é dW/dt = potência

Se **G** = calor → a taxa dQ/dt = taxa de transferência de calor

$$\frac{dG}{dt} = \text{taxa de } G \qquad \frac{dW}{dt} = \text{potência} \qquad \frac{dQ}{dt} = \text{taxa de transcal}$$

Figura 2: Taxas. Fonte: Notas de aula, 2023.

Quando a grandeza **G** se refere ao trabalho mecânico (força vezes deslocamento), sua variação em relação ao tempo é chamada de potência. Isso vale apenas para o trabalho mecânico, nada mais. Na área térmica, é comum falar em potência térmica, mas isso não está correto, já que só o trabalho instantâneo pode ser chamado de potência.

Quando se trata da variação de calor ao longo do tempo, em relação a uma referência temporal, estamos falando da taxa de transferência de calor. Embora os termos possam parecer complicados, é importante utilizá-los corretamente.

A utilização de unidades é muito importante e significativa na área de energia. As unidades são capazes de transmitir informações relevantes, basta prestar atenção nelas.

A energia é medida em joules no sistema internacional. Joules representa a quantidade de energia, e a taxa de energia é expressa em joules por segundo, que é conhecido como watt.

Taxa de Energia

- Calor e trabalho são expressos em joule (J)
- Suas taxas em watt

$$\frac{[J]}{[s]} = [W] \quad \begin{array}{l} \text{Potência} \\ \text{Taxa de transferência de calor} \end{array}$$

Figura 3: Taxas. Fonte: Notas de aula, 2023.

Se o joule estiver relacionado com trabalho mecânico, é considerada a potência. Se estiver relacionado com transferência de calor, é a taxa de transferência de calor. Ambas são medidas em watts.

Felizmente, o sistema internacional integra essas duas manifestações da energia, evitando que utilizemos unidades diferentes, como quilocaloria e HP. É importante ressaltar que uma é a potência e a outra é a taxa de transferência de calor. Já o consumo energético de Hidrogênio Verde é calculado a partir da taxa de consumo, medida em joule por segundo.

Para obter o consumo total, é necessário realizar uma integral ao longo do tempo. Essa integral é um somatório, em que se acumula a quantidade de energia consumida em cada instante. O resultado dessa integral é dado em Joule, que é a unidade de energia.

É importante lembrar que a unidade de medida da taxa de consumo é watt, que é uma unidade de potência ou transferência de calor. Para evitar confusão entre a taxa de consumo e o consumo total, os eletricitistas desenvolveram o conceito de quilowatt-hora (kWh).

Um kWh é a energia consumida por um dispositivo com uma potência de 1 kW ligado por 1 hora. Dessa forma, é possível expressar o consumo total de forma mais intuitiva e compreensível. É importante entender essa diferença entre a taxa de consumo e o consumo total para

interpretar os gráficos de consumo de Hidrogênio Verde e outras fontes de energia.

Integralização da taxa:
Taxas contabilizadas no tempo » CONSUMO

$$\int_{inicial}^{final} \frac{dG}{dt} dt = G \Delta t$$

$$\frac{[J]}{[s]} [s] = [J] \quad \frac{[J]}{[s]} \frac{[h]}{[3600 s]} [s] = [W][h] \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{intuitivo} \\ \text{ordem de grandeza da informação} \end{array} \right.$$

Figura 4: Taxas. Fonte: Notas de aula, 2023.

Vamos observar, na imagem a seguir, uma fatura de eletricidade de uma empresa com contrato de consumo e demanda diferenciados.

Fatura de eletricidade			
	Itens Faturados	Tar. sem Impostos	Valor
Consumo	Consumo Ponta 23.520 kWh a 0,642770	0,64277	15.117,95
	Demanda 869 kW a 5,660000	5,660000	4.918,54
Demanda	Consumo F/Ponta 222.600 kWh a 0,201190	0,201190	44.784,89
	En R Exc F/Ponta 2.520 kWh a 0,163300	0,163300	411,51
Consumo	Contribuição de Iluminação Pública (COSIP)		4.943,02

Figura 5: Taxas. Fonte: Notas de aula, 2023.

Destaca-se que o consumo de energia elétrica, medido em kWh, é integrado e pode ser dividido em "Ponta" e "Fora Ponta", que representam os horários de consumo dessa energia.

Já a demanda é medida em kW e representa a potência utilizada pelo equipamento instalado. É por meio dessas unidades de medida que é possível dimensionar a rede necessária para o consumo de energia. É válido lembrar que essas informações podem variar de acordo com o tipo de contrato e a empresa de energia elétrica.

Vamos falar sobre três palavras-chaves importantes para entendermos o contexto da energia: equilíbrio, geração e consumo.

Primeiramente, vamos falar sobre **geração de energia**, que é a oferta de energia para o sistema. Em um país de dimensão continental como o nosso, prever a geração necessária para atender à demanda futura é um grande desafio. É necessário considerar o crescimento populacional e

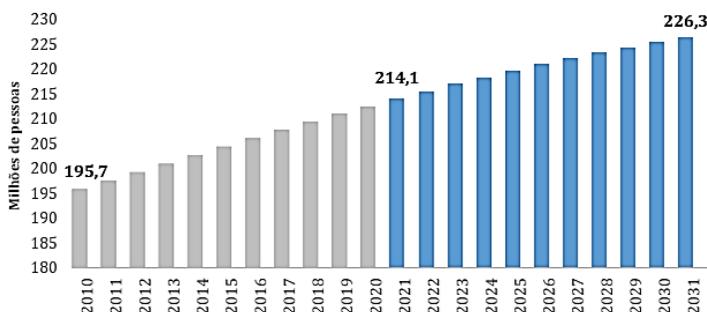
entender o comportamento dessa população: se está crescendo muito, pouco ou se está estável.

Além disso, é preciso **dimensionar e prever a geração** que será necessária no futuro, para garantir que a oferta de energia seja suficiente.

Na Fig. 6 podemos observar que o Brasil apresenta um crescimento populacional positivo, porém não desenfreado. Percebe-se que há uma mudança na pirâmide etária da população, com menos jovens e mais idosos. Esses são dados importantes a serem considerados.

Equilíbrio de Geração x Consumo de Energia: Crescimento populacional

Gráfico 1 - 1: Evolução da população brasileira



Fonte: Elaboração EPE, com base em IBGE (2018).

Figura 6: Crescimento populacional. Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2031/ Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2022.

Outro aspecto relevante é o crescimento econômico, que pode ser influenciado por diversos fatores, como as políticas adotadas, confiança, a demanda por produtos e serviços, entre outros.

É comum fazer cenários para prever o futuro da economia, considerando diferentes possibilidades. Por exemplo, um cenário otimista pode prever grandes mudanças econômicas e desenvolvimento, enquanto um cenário pessimista pode indicar que tudo dará errado.

É importante considerar diferentes cenários e estar preparado para enfrentar desafios, como aqueles relacionados à transição para fontes de energia mais sustentáveis, como o hidrogênio verde. Na Fig. 7

podemos ver como o crescimento populacional está diretamente ligado ao crescimento econômico.

Para que a economia cresça, é necessário atender às necessidades da população e isso está totalmente interligado.

Essas informações foram retiradas do Plano Decenal de Expansão de Energia, um documento elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o ano de 2031, publicado em 2022 com dados de 2021.

O documento traz informações importantes sobre a expansão energética no país e é um importante guia para a tomada de decisões nessa área.

O Hidrogênio Verde é uma tecnologia que tem sido muito discutida atualmente no contexto da expansão da geração de energia.

Equilíbrio de Geração x Consumo de Energia: Crescimento econômico

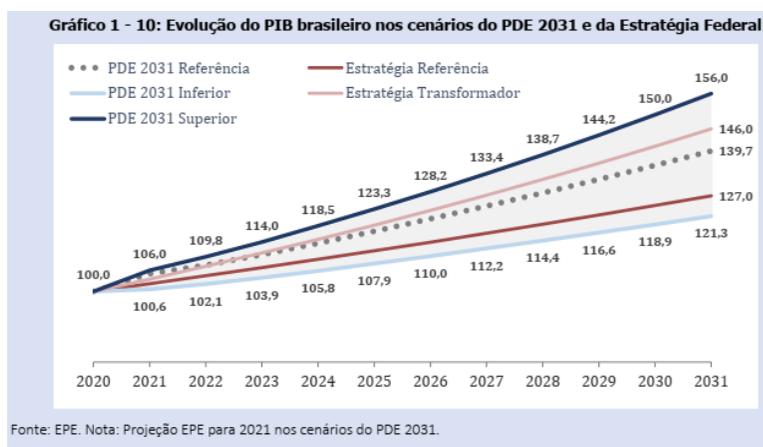


Figura 7: Crescimento econômico. Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2031/ Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2022.

Isso se deve, em grande parte, à necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂ equivalente, que inclui todos os gases que contribuem para o aquecimento global.

Está cada vez mais difícil obter licenças ambientais para projetos baseados em combustíveis fósseis, como o carvão, que já não são mais incentivados pelo governo.

Uma tendência que está em alta atualmente é a eletrificação, que envolve a conversão de sistemas e equipamentos que usam combustíveis em eletricidade. Isso inclui, por exemplo, a substituição de carros com motor de combustão interna por carros elétricos.

Além disso, o uso de aparelhos de ar-condicionado com ciclo reverso, conhecidos como bomba de calor, tem se popularizado, especialmente em regiões mais frias, como o sul do Brasil. Nesse contexto, o Hidrogênio Verde surge como uma alternativa para a calefação de ambientes, especialmente na Europa, que enfrenta restrições no fornecimento de gás natural.

O hidrogênio pode substituir o gás natural na queima e suprir a demanda de calefação residencial, comercial e industrial. Isso implica em uma previsão de aumento da demanda de energia para suprir a expansão da eletrificação e de outros sistemas que podem ser movidos por eletricidade.

A geração distribuída é outra tendência que está modificando profundamente o setor energético. Com essa tecnologia, o mesmo local que antes era apenas consumidor (Fig. 8), pode se tornar também um gerador de energia, o que ocasiona mudanças significativas nos hábitos e costumes das pessoas.

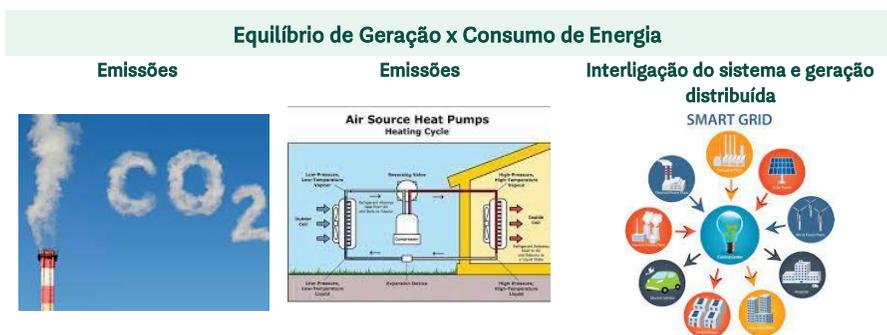


Figura 8: Equilíbrio de Geração x Consumo de Energia. Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2031/ Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2022.

Em relação à geração de energia, é importante fazer um planejamento cuidadoso.

No plano de 2031, por exemplo, os analistas previram pontos críticos que precisariam ser considerados. É interessante analisar o passado para entender como a visão das pessoas mudou ao longo do tempo. A pandemia de covid-19, por exemplo, não foi prevista nos planos de energia anteriores, mas agora é um fator crítico a ser considerado.

Ao analisar a tabela apresentada a seguir, é possível observar a importância de considerar diferentes cenários ao fazer previsões. É essencial não fazer previsões sem levar em conta possíveis cenários positivos, negativos ou neutros.

Pontos considerados no PDE 2031

Tabela 1 - 1: Principais diferenças de premissas entre o cenário de referência e os alternativos

PONTOS CRÍTICOS	CENÁRIO INFERIOR	CENÁRIO REFERÊNCIA	CENÁRIO SUPERIOR
EVOLUÇÃO DA PANDEMIA	Novas ondas da doença resultam em uma duração mais longa da pandemia no país.	Ritmo de vacinação permite imunizar grande parcela da população em 2021, com redução gradual do número de casos e ausência de novas ondas.	Aceleração na vacinação permite a redução acentuada do número de casos e ausência de novas ondas.
CONFIANÇA E RITMO DA RECUPERAÇÃO	Cenário de elevada incerteza interrompe recuperação da economia, que fica estagnada no curto prazo	Cenário com menor incerteza relacionada à pandemia permite um aumento da confiança e um processo de recuperação sustentado.	Cenário mais favorável permite um aumento acentuado da confiança e um processo de recuperação acelerado.
APROVAÇÃO DE REFORMAS E AMBIENTE DE NEGÓCIOS	Dificuldade na aprovação de reformas	Aprovação de reformas importantes ao longo do horizonte	Aprovação de reformas importantes já no curto prazo
PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES	Fraco crescimento	Crescimento gradual	Forte crescimento
CONTAS PÚBLICAS	Dificuldade de realização de ajuste fiscal	Ajuste fiscal com redução gradual da relação DLSP/PIB	Ajuste fiscal com redução significativa e mais rápida da relação DLSP/PIB

Fonte: EPE.

Figura 8: Crescimento econômico. Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2031/ Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2022.

Outros fatores importantes que devem ser considerados incluem confiança, aprovação de reformas e ambientes de negócios, produtividade total e contas públicas. Ao fazer previsões de energia para os próximos 10 anos, é essencial levar em conta todos esses aspectos, bem como o crescimento populacional, o crescimento econômico, a distribuição de energia, as emissões e a demanda por eletrificação.

No entanto, é importante lembrar que a lista de fatores críticos apresentados pode não ser exaustiva. Como um planejador, é fundamental pensar em todos os possíveis fatores que possam influenciar o cenário energético nos próximos anos e sinalizar quais ações devem ser tomadas para lidar com eles.

O Hidrogênio Verde vem sendo cada vez mais discutido como uma alternativa aos combustíveis fósseis. No entanto, a invasão da Ucrânia pela Rússia trouxe uma necessidade ainda maior para a introdução do hidrogênio no mercado europeu.

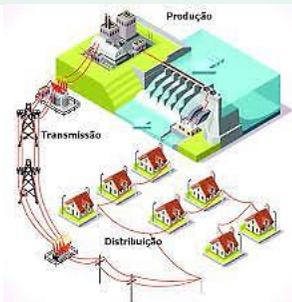
A substituição dos combustíveis gasosos pelo hidrogênio é agora uma necessidade urgente e não mais apenas uma oportunidade. Isso tem impulsionado ainda mais o desenvolvimento e a implementação de tecnologias relacionadas ao Hidrogênio Verde.

É por isso que estamos em um programa financiado por um país europeu, pois a demanda por Hidrogênio Verde é extremamente forte na Europa.

A invasão da Ucrânia mostrou a importância da diversificação de fontes de energia e a necessidade de investimentos em fontes renováveis, como o Hidrogênio Verde.

No contexto de Hidrogênio Verde, é importante entender o consumo de energia no Brasil e como ele pode ser afetado pela incorporação de novos consumidores. Como o país continua a crescer em população, novos consumidores serão introduzidos ao mercado de energia.

Dificuldade de previsão do crescimento da demanda:



- Incorporação de novos consumidores;
- Mudança de perfil;
 - do consumidor (posicionamento)
 - do consumo (tecnologia).
- Mobilidade e modais do transporte de cargas;
- Implantação de novos empreendimentos de geração;
 - tempo e \$.
- As limitações para importar/exportar;
- **Armazenamento de energia?**

Figura 9: Dificuldade de previsão do crescimento da demanda. Fonte: VELHO, Guilherme. "A Importância do Equilíbrio entre Oferta e Demanda de Energia Elétrica". Agência Canal energia. Rio de Janeiro, 28 de junho de 2017.

Mas também é importante considerar a grande massa da população que ainda não tem acesso a bens básicos como habitação, alimentação e saúde. Essa parcela da população pode ser considerada um potencial demandante de energia se tiverem acesso a bens de consumo em geral, resultando em um aumento no consumo de energia no país.

Além disso, é importante considerar as mudanças no perfil de consumo dos consumidores, que cada vez mais demandam fontes de energia limpas e sustentáveis. O avanço da tecnologia também tem um impacto significativo no consumo de energia, com a popularização de celulares e outros dispositivos eletrônicos, bem como a demanda gerada pelos animais de estimação.

Para prever o consumo de energia no futuro, é necessário levar em consideração tanto os fatores econômicos e políticos quanto as mudanças no comportamento e perfil de consumo dos consumidores. O hidrogênio verde pode ser uma solução sustentável para atender a essa demanda crescente de energia, fornecendo uma alternativa limpa e renovável aos combustíveis fósseis.

Em relação à mobilidade e transporte de carga, fica evidente que o modal rodoviário baseado em óleo diesel seja dominante no Brasil, juntamente à aviação, que tem natureza de carga.

Entretanto, é importante questionar se não teríamos outras formas de transporte e como elas poderiam influenciar nosso padrão de consumo.

No Brasil, temos um grande potencial de navegação por dentro do país e uma costa extensa que poderia ser mais bem explorada, além de um sistema ferroviário que poderia voltar a transportar passageiros.

É interessante lembrar que, em 1930, Getúlio Vargas viajou do interior do Rio Grande do Sul até o Rio de Janeiro de trem, já que havia uma linha férrea que ligava essas regiões. Hoje, não temos mais essa opção de transporte ferroviário.

Quando pensamos em novos empreendimentos de energia, é preciso levar em conta que eles exigem um alto investimento financeiro e um tempo considerável para sua implementação. Vale ressaltar também que, é importante destacar o papel do armazenamento de energia na

nossa rede interna de distribuição, que permite importação e exportação entre estados e entre supermercados de energia.

Nesse sentido, o hidrogênio verde pode ser uma solução interessante para o transporte de carga e para a geração de energia em geral. Ele é uma fonte limpa e renovável de energia, que pode ser produzida a partir da eletrólise da água usando energia elétrica renovável.

Somado a isso, o Hidrogênio Verde pode ser armazenado e transportado, o que o torna uma opção flexível e segura para o abastecimento de veículos e para o fornecimento de energia elétrica em momentos de pico de demanda ou em regiões remotas.

A matriz energética é responsável por armazenar a energia elétrica e outras formas de energia. Embora o consumo de eletricidade seja instantâneo, a geração de energia elétrica precisa ser acumulada para atender à demanda.

No Brasil, 65% da matriz elétrica é composta por hidrelétricas, caracterizadas por terem acumulação de energia. Isso é diferente de países como Austrália e Estados Unidos, que têm matrizes elétricas baseadas em carvão e gás natural, sem acumulação.

A energia eólica e solar são renováveis, mas ainda não têm capacidade de acumulação suficiente. É aí que entra o Hidrogênio Verde, que tem um papel importante de acumulação. Quando há excedente de energia, ela pode ser armazenada em hidrogênio, que pode ser produzido através da eletrólise da água.

Existem várias maneiras de armazenar energia, incluindo baterias, ar comprimido e rodas cinéticas, mas o hidrogênio é uma opção promissora, pois pode ser utilizado como combustível em veículos e geradores.

A hidroeletricidade brasileira pode desempenhar um papel importante na acumulação de energia, permitindo que os excedentes sejam colocados na rede e armazenados como água nas hidrelétricas.

O Hidrogênio Verde pode ser uma solução complementar para a matriz energética brasileira, permitindo que o país atinja uma matriz mais sustentável e com maior capacidade de acumulação de energia.

O Hidrogênio Verde é uma fonte de energia renovável e limpa que tem sido cada vez mais estudada e utilizada em todo o mundo. Para entender melhor como podemos equilibrar a geração e o consumo de energia, é importante analisar as emissões de gases de efeito estufa em diferentes setores da economia.

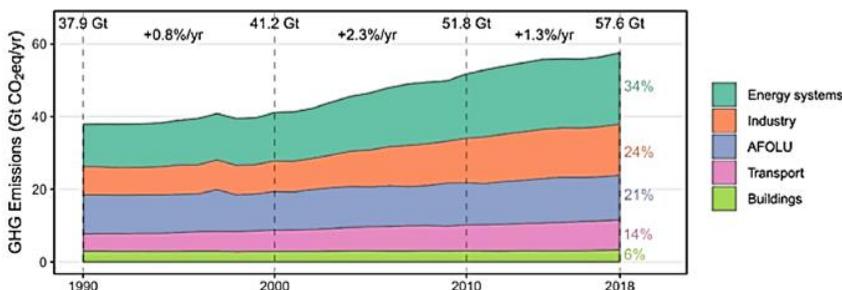
De acordo com dados de 1990 a 2018, é possível observar que a produção de energia e a indústria são responsáveis por mais de 50% das emissões de gases de efeito estufa. Somado a isso, a edificação, o transporte e a agricultura também são setores relevantes nesse aspecto.

No caso específico do Brasil, como um país com forte presença na agroindústria, é importante destacar que o desmatamento e a redução de áreas florestais também contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, já que a preservação da vegetação é fundamental para a captura de carbono.

Ao analisar esses dados, podemos questionar se estamos mudando o padrão de consumo e geração de energia ou se estamos repetindo padrões do passado. É fundamental identificar quais são os setores mais relevantes e que medidas podem ser tomadas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Total global GHG emissions trends

AFOLU = agriculture, forestry and other land uses



Há mudanças no padrão?

Algum setor é pior?

Algum setor é melhor?

Figura 10: Total global GHG emission trends. Lamb, William F et al, 2021. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. Environmental Research Letters.

Nesse sentido, destaca-se que a agricultura ainda é um setor que precisa avançar na questão ambiental, especialmente em relação à preservação de áreas verdes e redução do desmatamento.

É fundamental buscar soluções mais sustentáveis e eficientes para garantir o equilíbrio entre geração e consumo de energia, e o Hidrogênio Verde pode ser uma alternativa importante nesse sentido.

1.2. Transição energética

Hidrogênio Verde é um conceito cada vez mais presente na transição energética global. Este termo se refere ao hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis, como a energia solar e eólica, sem emitir gases de efeito estufa.

A transição energética é um processo complexo que envolve mudanças significativas na forma como produzimos e consumimos energia. Em vez de dependermos de combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão, precisamos mudar para fontes de energia limpas e renováveis, como a hidroeletricidade, a energia solar e eólica e, claro, o Hidrogênio Verde.

Transição energética



- Invasão da Ucrânia
- Relações internacionais
- Infraestrutura
- Cadeia produtiva e econômica
- Ponto de não retorno
- COPs e IPCC
- Novas oportunidades em jogo

Figura 11: Plano Decenal de Expansão de Energia 2031/ Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2022.

Essa transição não é simplesmente uma questão de passar de um extremo a outro. Em vez disso, precisamos transitar, reduzir e atenuar as emissões de gases de efeito estufa ao longo do tempo. Alcançar o objetivo de zero emissões desses gases pode levar tempo e requerer esforços contínuos.

O principal objetivo da transição energética é reduzir os riscos associados às mudanças climáticas e evitar o ponto de não retorno, que pode resultar em um desequilíbrio ambiental irreversível.

As conferências das partes (COPs) da ONU são importantes nesse sentido, fornecendo orientações para a ação climática global. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) também desempenha um papel crucial, fornecendo orientações científicas para a ação climática.

Embora a transição energética possa parecer um desafio assustador, ela também representa uma grande oportunidade para a indústria. A transição para a produção de Hidrogênio Verde pode oferecer novas oportunidades de negócios e promover o desenvolvimento sustentável.

No entanto, existem muitos obstáculos que podem frear a transição energética. Alguns deles incluem a falta de infraestrutura adequada para a produção e distribuição de Hidrogênio Verde, conflitos geopolíticos e desigualdades econômicas e sociais. É importante abordar esses problemas para garantir que a transição energética seja bem-sucedida e benéfica para todos.

1.3. Como oferta se converte em demanda?

Agora, vamos fazer uma passagem geral sobre como saímos da fonte primária para a fonte secundária, e discutir quais são os sistemas de conversão capazes de promover essa de um lado para o outro.

A Fig 11 apresenta doze fontes primárias de energia, algumas mais conhecidas que outras, e todas elas podem ser convertidas em calor, mecânica, eletricidade e combustível. As fontes de energia renováveis incluem a eólica, hidráulica, solar, biomassa, marés, ondas, algas e geotérmica. Já as fontes não renováveis incluem o petróleo, gás natural, carvão e energia nuclear.

Enquanto algumas pessoas consideram a energia nuclear renovável, outras não concordam, argumentando que a definição de "renovável" é muito ampla.

Embora o sol seja considerado uma fonte renovável, já que ele não acabará durante a vida útil da nossa civilização, a energia nuclear pode ser vista da mesma forma, pois ela é abundante no tempo.



Figura 12: Oferta se converte em demanda. Fonte: Notas de aulas, 2023.

Por outro lado, o petróleo, o gás natural e o carvão são considerados fontes não renováveis, pois levaram milhões de anos para se formar e não podem ser renovados dentro do prazo da vida humana.

As fontes primárias de energia são convertidas em energia secundária, usada para alimentar as fontes secundárias na sequência.

Esse processo começa com a queima de combustíveis para aquecer, cozinhar e realizar trabalho mecânico, até chegar à eletricidade e aos combustíveis secundários. É importante lembrar que as fontes renováveis são uma opção mais sustentável e amigável ao meio ambiente do que as fontes não renováveis.

O Hidrogênio Verde é uma opção que tem ganhado destaque por ser uma alternativa sustentável para a produção de energia. Nessa tecnologia, diferentes sistemas de conversão são utilizados para transformar fontes primárias em calor, energia mecânica, eletricidade ou combustível.

vento para gerar eletricidade. O painel solar fotovoltaico é capaz de gerar eletricidade a partir da energia solar.

No entanto, é importante destacar que, mesmo com uma grande variedade de fontes primárias renováveis disponíveis, a utilização dessas fontes é limitada em determinados sistemas de conversão.

Além disso, a produção de combustíveis a partir de fontes primárias é um processo complexo que envolve a realização de processos químicos, como a biodigestão e a gaseificação.

Em resumo, a tecnologia do Hidrogênio Verde envolve a utilização de diferentes sistemas de conversão para transformar fontes primárias em diferentes formas de energia secundária, como calor, eletricidade, mecânica e combustível.

A cogeração é um dos sistemas mais versáteis e os sistemas de conversão renováveis têm suas limitações em relação à sua utilização em diferentes sistemas. A produção de combustíveis a partir de fontes primárias também é um processo complexo que envolve processos químicos.

Um dos processos mais utilizados para a produção de hidrogênio é a eletrólise, que exige eletricidade como insumo. Para produzir eletricidade, são utilizados sistemas que convertem fontes primárias de energia em eletricidade.

As fontes primárias de energia renovável incluem hidroeletricidade, energia eólica, energia solar fotovoltaica e biogás, que é gerado pela conversão de rejeitos orgânicos em biometano. A biomassa energética também pode ser utilizada para produzir eletricidade e, posteriormente, hidrogênio.

No entanto, a classificação da biomassa como uma fonte primária renovável de energia ainda é uma questão controversa. Alguns países e instituições a consideram uma fonte verde, enquanto outros argumentam que a energia produzida a partir da biomassa compete com as áreas destinadas à produção de alimentos.

Para produzir Hidrogênio Verde, é necessário utilizar sistemas capazes de converter fontes primárias de energia renovável em eletricidade. Isso

pode ser feito por meio de usinas a vapor, geotermia, turbinas a gás que queimam biogás, ciclos combinados, motores alternativos, cogeração, turbinas hidráulicas, energia eólica e energia solar fotovoltaica.

Combustíveis e sistemas para produção de H₂

1. Petróleo
2. Gás Natural
3. Carvão
4. Nuclear
5. **Vento**
6. **Água**
7. **Sol**
8. **Biomassa**
9. Marés
10. Ondas
11. Algas
12. **Geotérmica**

Fonte Primária	Sistema
1,2,3,4,8,12	Usinas a vapor
1,2,8	Turbina a gás
1,2,8	Ciclo combinado
1,2,8	Motor alternativo
1,2,8	Cogeração
6	Turbina hidráulica
5	Aerogerador
7	Painel solar
	Biodigestor
	Gaseificador
	Queimador

Eletricidade → **Processo** → H₂

Figura 14: *Combustíveis e sistemas para produção de H₂. Fonte: Notas de aulas, 2023.*

Em resumo, a produção de Hidrogênio Verde é uma forma limpa e sustentável de obter hidrogênio a partir de fontes de energia renováveis, sem gerar emissões de CO₂. A escolha das fontes primárias de energia renovável para produzir eletricidade e, posteriormente, Hidrogênio Verde, é uma questão importante que deve ser considerada para garantir a sustentabilidade do processo.

1.4. Eletricidade e combustível

O Hidrogênio Verde pode ser produzido a partir de eletricidade de fontes primárias renováveis. O sistema mais comum é a usina a vapor, que funciona a partir da combustão de uma fonte primária, como a cana-de-açúcar, resíduos da agricultura, casca de arroz, palha do arroz, entre outras biomassas.

Na usina a vapor, a combustão ocorre em uma fornalha, gerando vapor que é convertido em energia mecânica por meio de uma turbina. Essa energia mecânica é transformada em energia elétrica, que produz eletricidade.

Para produzir Hidrogênio Verde, é necessário utilizar a eletricidade gerada pela usina a vapor, eletrolisando a água. Isso é realizado por meio

de um eletrólito, que separa o hidrogênio e o oxigênio presentes na água. O hidrogênio resultante é então armazenado para uso posterior.

A biomassa é a única fonte primária que pode ser utilizada para produzir Hidrogênio Verde na usina a vapor. Além disso, é fundamental que a energia gerada pelo vapor seja condensada para que a água possa ser recuperada e utilizada novamente no sistema.

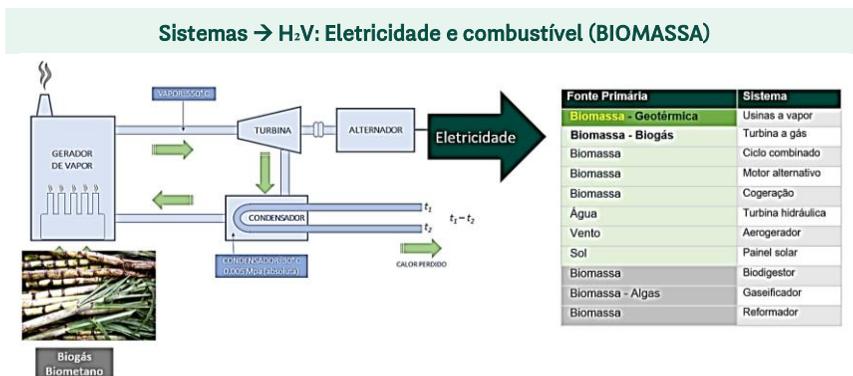


Figura 15: Biomassa. Fonte: Notas de aula, 2023.

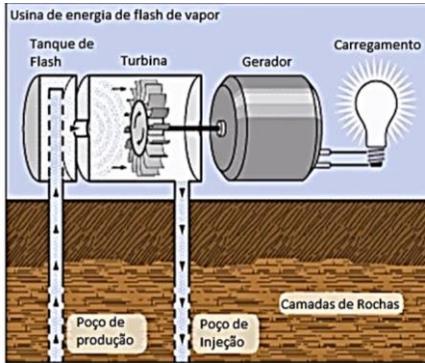
Com o uso de tecnologias como o Hidrogênio Verde é possível produzir energia limpa e renovável, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição para uma matriz energética mais sustentável.

A geotermia é uma fonte energética renovável que ainda não é utilizada no Brasil. Alguns países já utilizam essa fonte que aproveita a energia do interior da Terra, onde há altas temperaturas.

Essa energia é renovável, assim como a energia solar que também vem do sol e vai desaparecer daqui a bilhões de anos.

Apesar de ser uma fonte promissora, a geotermia ainda é pouco utilizada devido ao seu alto custo e complexidade. Mas isso não significa que ela não tenha potencial.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (GEOTÉRMICA)



Fonte Primária	Sistema
Biomassa - Geotérmica	Usinas a vapor
Biomassa - Biogás	Turbina a gás
Biomassa	Ciclo combinado
Biomassa	Motor alternativo
Biomassa	Cogeração
Água	Turbina hidráulica
Vento	Aerogerador
Sol	Painel solar
Biomassa	Biodigestor
Biomassa - Algas	Gaseificador
Biomassa	Reformador

Figura 16: Geotérmica. Fonte: Notas de aula, 2023.

O processo de aproveitamento da geotermia começa com a captação de água líquida do interior da Terra, que pode ser injetada ou recuperada em poços.

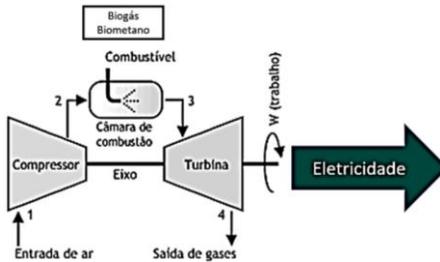
Em seguida, essa água é enviada para um tanque de redução de pressão, onde ela se transforma em vapor. Esse vapor é expandido em uma turbina, gerando eletricidade verde que pode ser utilizada para produzir Hidrogênio Verde.

A água que foi transformada em vapor retorna ao poço de injeção para ser aquecida novamente e seguir o ciclo. Para isso, utiliza-se uma bomba que faz a água ganhar energia e temperatura. Esse processo é similar ao de uma usina a vapor, mas utilizando a energia do interior da Terra.

A turbina a gás é um sistema de conversão muito popular e é utilizado em aviões a jato ou turbojato. Ela é composta por uma turbina a gás que é específica para fins aeronáuticos, mas que também é utilizada para a produção de eletricidade em turbinas estacionárias.

Na ponta da turbina é colocado um gerador elétrico que produz eletricidade com frequência de 60 Hz fixo e velocidade angular constante. Para gerar eletricidade, o ar é comprimido aumentando a pressão e a temperatura, e então, no combustor, é adicionado um combustível para liberar energia através da queima.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOMASSA – BIOGÁS)



Fonte Primária	Sistema
Biomassa - Geotérmica	Usinas a vapor
Biomassa - Biogás	Turbina a gás
Biomassa	Ciclo combinado
Biomassa	Motor alternativo
Biomassa	Cogeração
Água	Turbina hidráulica
Vento	Aerogerador
Sol	Painel solar
Biomassa	Biodigestor
Biomassa - Algas	Gasificador
Biomassa	Reformador

Figura 17: Biomassa-biogás. Fonte: Notas de aula, 2023.

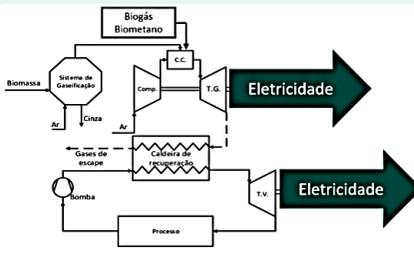
É possível utilizar combustíveis renováveis como biogás, biometano, etanol e combustíveis líquidos. A energia expandida na turbina produz trabalho mecânico e em seguida se transforma em eletricidade, enquanto os gases de combustão são expelidos.

Em resumo, a turbina a gás é capaz de produzir eletricidade a partir de combustíveis renováveis e, em seguida, pode ser usada para produzir Hidrogênio Verde.

O ciclo combinado é uma técnica que consiste na combinação de uma turbina a gás com uma usina a vapor. Ambos os sistemas são utilizados para gerar eletricidade, mas a grande vantagem é que é possível fazer isso usando apenas um combustível.

Dessa forma, você utiliza o seu combustível renovável, que pode ser biogás, biometano, etanol ou combustíveis líquidos, e queima-o na turbina a gás. O rejeito térmico é aproveitado para fazer funcionar a usina a vapor.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOMASSA)



Fonte Primária	Sistema
Biomassa - Geotérmica	Usinas a vapor
Biomassa - Biogás	Turbina a gás
Biomassa	Ciclo combinado
Biomassa	Motor alternativo
Biomassa	Cogeração
Água	Turbina hidráulica
Vento	Aerogerador
Sol	Painel solar
Biomassa	Biodigestor
Biomassa - Algas	Gasificador
Biomassa	Reformador

Figura 18: BIOMASSA. Fonte: Notas de aula, 2023.

Assim, você obtém duas vezes mais eletricidade na saída. Essa técnica é uma ótima forma de gerar eletricidade a partir de combustíveis renováveis e, posteriormente, produzir Hidrogênio Verde.

A seguir, temos um motor de combustão interna com funcionamento semelhante ao dos motores de automóveis.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOMASSA)

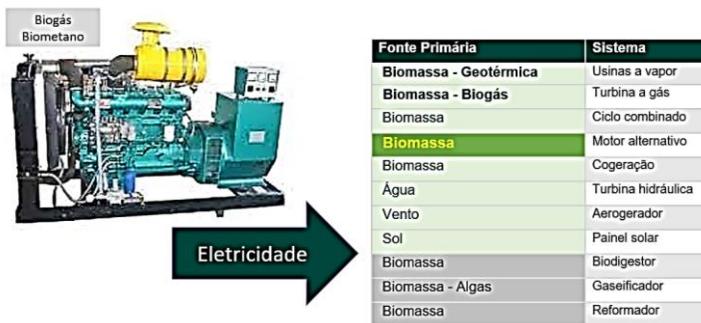


Figura 19: BIOMASSA. Fonte: Notas de aula, 2023.

Porém, em vez de uma caixa de câmbio que transmite energia mecânica para as rodas, ele possui um gerador elétrico acoplado.

Esse tipo de motor estacionário pode ser alimentado por diferentes tipos de combustíveis renováveis, como biogás, biometano e álcool, para produzir eletricidade que será usada na produção de Hidrogênio Verde.

A cogeração é uma técnica de produção simultânea de eletricidade e calor, diferente do ciclo combinado, que produz eletricidade em equipamentos separados.

Na cogeração, utiliza-se um equipamento alimentado por uma fonte renovável, como uma turbina a gás, para produzir eletricidade e calor.

O rejeito térmico gerado não pode ser transformado novamente em eletricidade, mas pode ser utilizado para diversas finalidades, como calefação, geração de vapor para processos industriais, banhos e até mesmo aquecimento de bancos.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOMASSA)

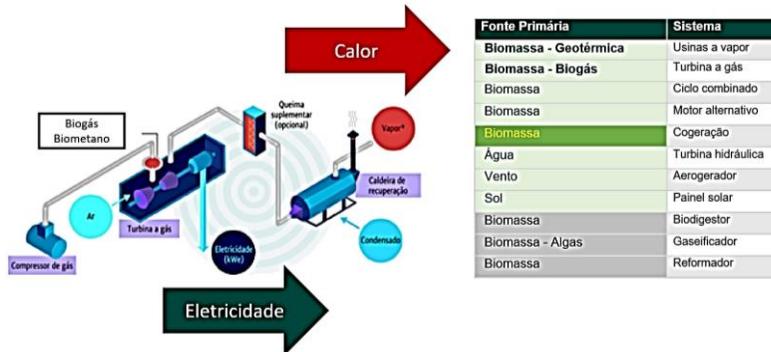


Figura 20: BIOMASSA Fonte: Notas de aula, 2023.

Essa técnica pode ser utilizada para produzir Hidrogênio Verde a partir da eletricidade gerada, o que torna o processo ainda mais sustentável. Vale lembrar que a cogeração não deve ser confundida com o ciclo combinado, que utiliza o mesmo combustível para produzir eletricidade em equipamentos diferentes.

A seguir, mencionaremos uma segunda forma de fazer cogeração, agora utilizando um motor de combustão interna. Esse motor funciona de maneira semelhante ao motor dos automóveis, mas em vez de transmitir energia mecânica para as rodas, ele gera eletricidade.

Além disso, ele também produz calor como um rejeito do seu funcionamento, tanto no radiador de água líquida quanto na descarga dos gases de combustão. Esse calor pode ser aproveitado para a produção de vapor ou outras finalidades, mas o foco aqui é na produção de eletricidade.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOMASSA)

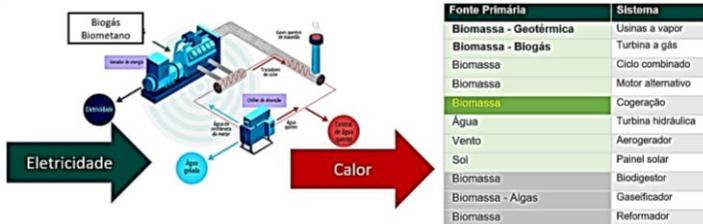


Figura 21: BIOMASSA. Fonte: Notas de aula, 2023.

É possível utilizar fontes renováveis de combustível, como biogás, biometano ou álcool, para produzir eletricidade e, conseqüentemente, produzir Hidrogênio Verde.

Agora, abordaremos um sistema utilizado na indústria sucroalcooleira brasileira para produção de eletricidade e calor, a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Esse sistema é alimentado 100% com biomassa, ou seja, não utiliza combustíveis fósseis.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOMASSA)

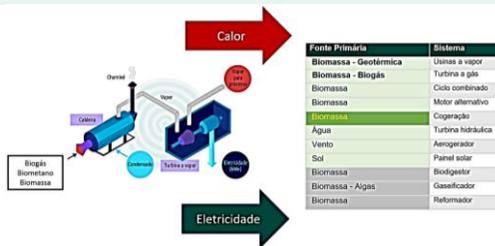


Figura 22: BIOMASSA.

Fonte: Notas de aula, 2023.

O processo começa com a queima do bagaço da cana em um queimador, que produz vapor. Esse vapor pode ser utilizado na expansão de uma turbina ou indiretamente como calor. Dessa forma, é possível produzir eletricidade e calor simultaneamente, por meio da cogeração.

Caso a eletricidade produzida possa passar por uma eletrólise, é possível produzir Hidrogênio Verde utilizando a energia elétrica gerada a partir da biomassa. Esse processo é um exemplo de como a indústria sucroalcooleira pode contribuir para a produção de energia limpa e renovável, utilizando o Hidrogênio Verde como uma opção sustentável.

A hidroeletricidade é um sistema extremamente promissor no Brasil. Ele é baseado na geração de energia elétrica a partir do movimento da água. Para isso, utilizamos turbinas hidráulicas que convertem a energia mecânica da água em energia elétrica, como demonstrado a seguir.

O processo começa com a captação da água em um reservatório, que então é conduzida por um coletor e por um duto.

Em seguida, a água é direcionada para a turbina, que realiza a conversão da energia mecânica em energia elétrica. Esse processo todo é

extremamente limpo e renovável, uma vez que utiliza como fonte de energia a água em movimento.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (ÁGUA)

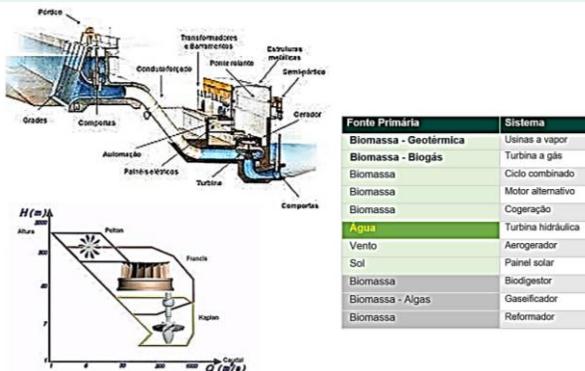


Figura 23: ÁGUA. Fonte: Notas de aula, 2023

Além disso, é possível utilizar a eletricidade gerada na hidroeletricidade em um processo de eletrólise para produzir Hidrogênio Verde. Esse processo utiliza a eletricidade gerada pela hidroeletricidade para separar as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio.

Assim, a hidroeletricidade é uma fonte de energia renovável e limpa que pode ser usada para produzir Hidrogênio Verde.

Já a energia eólica é uma fonte de energia renovável que utiliza o vento para produzir eletricidade. O Brasil possui um enorme potencial eólico e existem diferentes tipos de aerogeradores que podem ser utilizados para gerar energia elétrica.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (VENTO)



Figura 24: VENTO. Fonte: Notas de aula, 2023

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais comuns e são instalados em grandes parques eólicos. Eles possuem turbinas com diâmetros de dezenas de metros e potências instaladas cada vez maiores, podendo chegar a 7 MW.

Uma fronteira tecnológica interessante na energia eólica é a utilização de geradores flutuantes, que podem ser ancorados no fundo do mar ou simplesmente boiar na superfície, ao sabor do vento. Essa tecnologia é muito promissora para áreas offshore.

Existem também geradores de menor eficiência, porém mais adequados para ambientes urbanos, onde o vento é mais instável. Esses geradores são ideais para pequenas instalações em prédios ou áreas urbanas.

A energia eólica é uma importante fonte de energia renovável e pode contribuir significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa. É uma tecnologia em constante evolução e com grande potencial de crescimento no Brasil e no mundo.

O uso da energia solar pode ser aproveitado de duas formas principais: solar térmico e solar fotovoltaico. O solar térmico é usado principalmente para aquecer água em baixas temperaturas, mas não é adequado para a produção de Hidrogênio Verde, pois não produz eletricidade.



Figura 25: SOL. Fonte: Notas de aula, 2023

Já o solar fotovoltaico, que produz eletricidade diretamente, apresenta o problema da intermitência, ou seja, a produção só ocorre quando há sol disponível.

Para solucionar essa questão, uma das opções é armazenar a energia gerada em Hidrogênio Verde, já que esse gás pode ser produzido a partir da eletrólise da água com energia elétrica renovável. O Hidrogênio Verde pode ser armazenado por longos períodos e utilizado como combustível em diversos setores.

Outras formas de armazenamento de energia renovável incluem o armazenamento em baterias, porém essa opção é mais adequada para curtos períodos.

Além disso, outra opção de armazenamento é a utilização da água, onde a energia é armazenada na forma de água que não é utilizada na produção de hidroeletricidade. Mas, sem dúvidas, a produção de Hidrogênio Verde é uma alternativa muito promissora para o armazenamento e aproveitamento da energia gerada por fontes renováveis.

Agora, abordaremos a importância do uso de biogás na produção de combustíveis, principalmente no Brasil, devido à grande quantidade de rejeitos orgânicos produzidos pelo agronegócio. Esses rejeitos são bem aproveitados tecnicamente, mas enfrentam desafios de distribuição e logística, especialmente por serem produzidos no interior do país.

A partir do biogás é possível produzir hidrogênio por meio de processos de reforma, retirando o "C" e deixando apenas os hidrogênios. Além disso, é possível gerar eletricidade que pode ser usada no processo de eletrólise para produzir hidrogênio novamente. No entanto, o problema do que fazer com os carbonos ainda precisa ser resolvido.

O uso de biogás para a produção de hidrogênio é uma tecnologia interessante e com grande potencial de crescimento no futuro, mas requer soluções para questões de distribuição e logística, bem como para o destino dos carbonos.

Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de soluções para esses desafios, o uso de biogás na produção de Hidrogênio Verde pode se tornar cada vez mais viável e sustentável.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOGÁS)

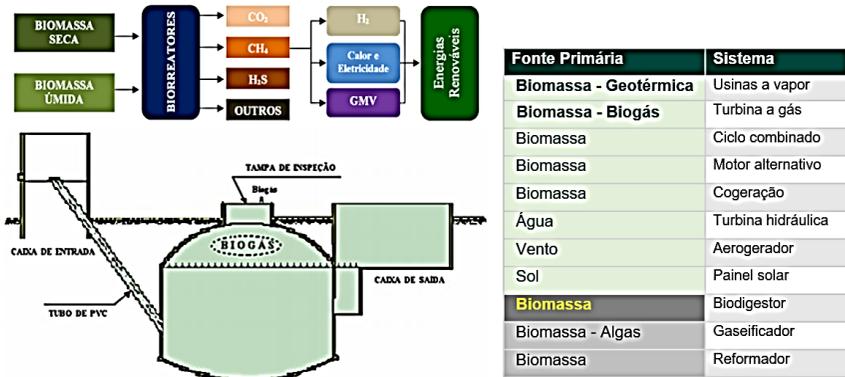


Figura 26: BIOGÁS. Fonte: Notas de aula, 2023

A gaseificação é uma técnica que tem potencial para produção de gás de síntese com diferentes composições, podendo ser rico em hidrogênio, metano ou CO, dependendo do processo utilizado. No entanto, ele é complexo e exige sistemas grandes para ser economicamente viável, com uma demanda de 600 mW de eletricidade para que valha a pena.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (BIOMASSA-ALGAS)

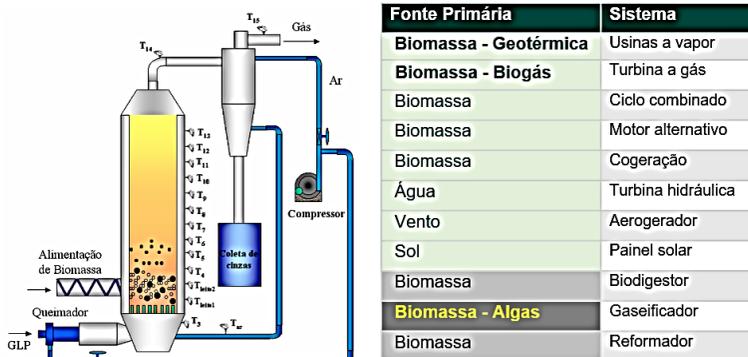


Figura 27: BIOMASSA-ALGAS. Fonte: Notas de aula, 2023

A gaseificação pode utilizar diversos tipos de combustíveis sólidos, como lenha, carvão e biomassa para produzir o gás. Embora seja um processo um pouco complicado, não se pode descartar seu potencial para a produção de energia a partir de fontes renováveis.

A produção de Hidrogênio Verde também pode ser realizada a partir de combustíveis já processados, como o etanol. Isso é possível por meio de um processo chamado reforma, que é bastante eficiente para combustíveis líquidos e gasosos.

Nesse processo, que não envolve combustão, a biomassa é submetida a altas temperaturas, resultando na separação dos componentes que a compõe. No caso do etanol, como ele contém uma grande quantidade de radicais OH, é possível separar o H do O e obter hidrogênio como produto final.

A reforma é uma técnica importante para a produção de Hidrogênio Verde a partir de biomassa, e pode ser uma alternativa interessante para o aproveitamento de resíduos orgânicos e combustíveis já processados.

Sistemas → H₂V: Eletricidade e combustível (ETANOL)

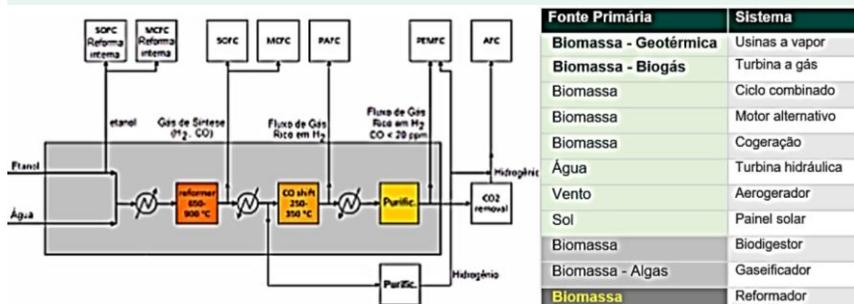


Figura 28: ETANOL.

Fonte: Notas de aula, 2023. <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1460.pdf>

No mapa a seguir, discute-se o conceito de Hidrogênio Verde e as suas possíveis fontes de produção. Nesse sentido, a biomassa é uma fonte potencial de Hidrogênio Verde, mas sua utilização deve ser discutida politicamente para que não comprometa a produção de alimentos.



Figura 29: Panorama do H₂V. Fonte: www.portalhidrogenioverde.com.br
Fonte: Notas de aula, 2023. <https://www.h.verdebrasil.com.br/o-que-e-hidrogenio-verde/>

Diversas técnicas de produção de Hidrogênio Verde são apresentadas, sendo a eletrólise a mais popular. Após a produção, o hidrogênio pode ser utilizado diretamente em equipamentos, ser distribuído ou até mesmo transportado em navios, para consumo na rede de distribuição de hidrogênio, um interesse que hoje a Europa tem fortemente.

Rotas para o H₂

- Fontes renováveis de eletricidade (hidrelétrica, PCH, eólica, solar fotovoltaica e biomassa) -> eletrólise -> Hidrogênio Verde.
- Combustíveis renováveis (biomassa, etanol, óleo, bagaço e resíduos em geral) -> reforma ou gaseificação -> Hidrogênio Verde.

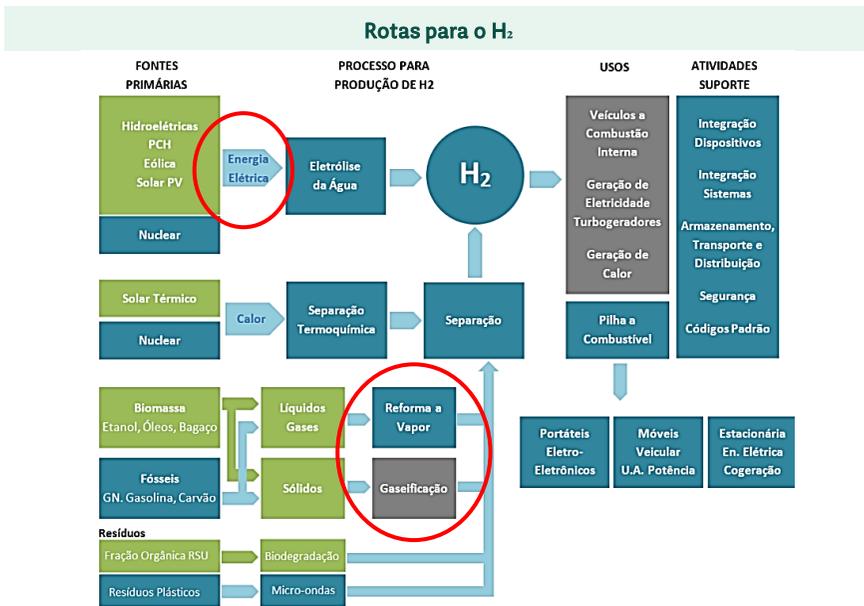


Figura 30: **Rotas para o H₂**. Fonte: Notas de aula, 2023. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnH/HidrogenioRelatiodiretrizes.pdf>

No Brasil, a indústria pesada é uma grande beneficiária do uso de hidrogênio como combustível. Isso porque algumas indústrias são muito "energívoras" e necessitam de alta temperatura para a produção, como siderurgia, cimento e vidro. Há uma utilização do Brasil bem interessante também para hidrogênio.

O Hidrogênio Verde é produzido a partir de fontes renováveis de eletricidade, como hidrelétrica, pequenas centrais hidrelétricas (PCH), eólica, solar fotovoltaica e biomassa, onde passam eletrólise

Na produção de combustíveis, podemos utilizar a biomassa, etanol, óleo, bagaço e resíduos em geral, através de processos de reforma ou gaseificação.

É importante lembrar que outros combustíveis também podem gerar hidrogênio, mas não serão considerados Hidrogênio Verde se não forem produzidos a partir de fontes renováveis e passarem pelo processo de eletrólise. Para resumir, o quadro a seguir mostra o mapeamento simplificado das fontes primárias para produzir Hidrogênio Verde:

Rotas para o H₂ → obtenção

- Eletricidade + H₂O → H₂ (eletrólise)
 - Alcalina Clássica
 - Membrana Polimérica Eletrolítica (PEM – *Polymer Electrolyte Membrane*).
- Calor + H₂O → H₂ (ciclos termoquímicos a alta temperatura)
- Biomassa → H₂ (gaseificação)
- Biocombustíveis → H₂ (reforma)
- Resíduos → H₂ (processos biológicos)

Figura 31: Fonte: Notas de aula, 2023. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogeno%CC%82nio_rev01%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrogeno%CC%82nio_rev01%20(1).pdf)

Existem diferentes rotas para se obter hidrogênio, e a primeira delas é através da eletricidade que, em conjunto com a água, passa pelo processo de eletrólise para gerar hidrogênio.

É importante ressaltar que, para ser considerado Hidrogênio Verde, a eletricidade utilizada na eletrólise deve ser proveniente de fontes renováveis, como hidrelétrica, solar fotovoltaica, eólica e biomassa.

Outra forma de obtenção de hidrogênio é através de ciclos termoquímicos a alta temperatura, que requerem calor e água. Nesse processo, a água é separada em hidrogênio e oxigênio, resultando em H₂.

Além disso, é possível utilizar biomassa para gaseificação, biocombustível por reformas e resíduos por diferentes processos, incluindo o biológico.

É importante lembrar que o uso de fontes renováveis para a produção de hidrogênio é fundamental para garantir a sustentabilidade e a redução das emissões de gases poluentes. Por isso, é necessário que haja investimentos em pesquisas e tecnologias para que o Hidrogênio Verde se torne cada vez mais acessível e viável para ser utilizado como fonte de energia limpa e renovável.

2. Acumulação de energia

Iremos abordar o tema da acumulação de energia. É importante entender que, muitas vezes, há uma necessidade de carga, mas não há disponibilidade de energia naquele momento.

Nesses casos, é possível buscar energia acumulada em algum lugar, como se fosse uma prateleira onde guardaremos a energia que produzida anteriormente.

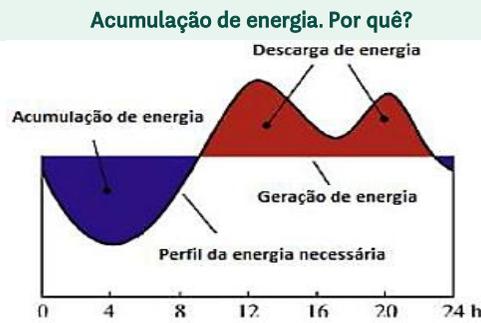


Figura 32: Fonte: Notas de aula, 2023. Campos, 2014. *Tecnologias de Acumulação de Energia: Um levantamento simplificado. FEUP (Porto, Portugal)*

Da mesma forma, quando temos capacidade de produção de energia, mas não há para quem entregá-la, podemos acumulá-la. É importante destacar que o conceito de acumulação de energia é fundamental para garantir um equilíbrio entre sua oferta e demanda.

Essa ideia é aplicável em qualquer área que envolva energia, incluindo a produção de Hidrogênio Verde. Por isso, é fundamental entender como funciona a acumulação de energia para garantir um sistema eficiente e sustentável.

A acumulação é uma forma importante de garantir o acerto entre oferta e demanda. Uma das maneiras mais comuns de fazer isso é por meio do armazenamento, presente em diferentes formas de combustíveis, desde os mais simples até os mais complexos.

Um exemplo de armazenamento simples é a biomassa, que pode ser cultivada como madeira energética e estocada até ser utilizada. Já nas indústrias petroquímicas, existem diferentes tipos de combustíveis

processados que ficam estocados até serem utilizados, sendo também uma forma de armazenamento de energia.

Acumulação de energia. Como?

Energia → Armazenamento químico nos combustíveis



Figura 33: Armazenamento químico nos combustíveis Fonte: Notas de aula, 2023.

Quando se trata de eletricidade, a questão do armazenamento se torna diferente. Diferente dos combustíveis, não é possível armazená-la na sua forma primária. Por isso, é necessário converter a fonte primária de energia em eletricidade e depois armazená-la.

E quando a fonte primária já foi convertida em eletricidade?

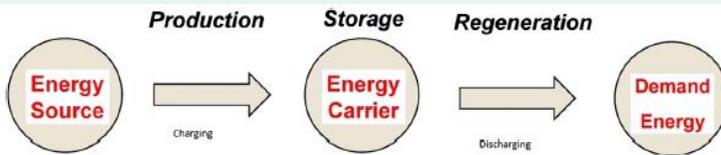


Figura 34: E quando a fonte primária já foi convertida em eletricidade? Fonte: Notas de aula, 2023.

É o caso do Hidrogênio Verde, que pode ser produzido a partir da eletrólise da água, utilizando eletricidade gerada por fontes renováveis como a solar e a eólica. O hidrogênio pode então ser armazenado e, quando necessário, ser utilizado em uma célula de combustível para produzir eletricidade.

Esse processo permite o armazenamento de energia em grande escala e pode ajudar a equilibrar a sua oferta e demanda em momentos de pico

de consumo ou quando a produção de energia renovável excede a demanda.

Ao pensarmos em acumulação de energia elétrica, precisamos considerar a questão do armazenamento. Diferentemente dos combustíveis, a eletricidade não pode ser armazenada na sua forma original, por isso é necessário converter a energia primária em eletricidade e, em seguida, armazená-la.

A figura a seguir, mostra as diferentes formas de acumulação de energia.

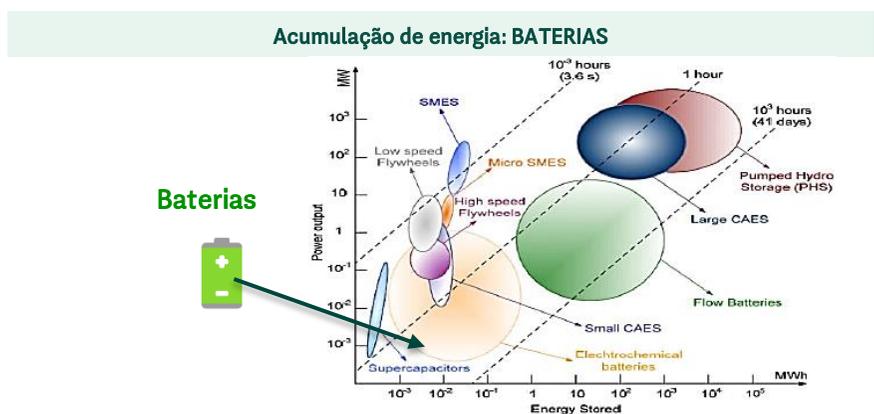


Figura 35: BATERIAS. Fonte: Energy Storage: Technologies and Applications. Rijeka, Croatia. InTec

No eixo horizontal, temos a energia armazenada em MWh ou joules, enquanto no eixo vertical temos a potência, que indica a capacidade de descarregar a energia de forma instantânea. As linhas pontilhadas representam os referenciais de tempo para armazenamento, sendo que algumas linhas superiores representam tempos menores, e as inferiores, tempos maiores.

Diversos sistemas de armazenamento são apresentados nessa figura, mas ainda não há a inclusão do Hidrogênio Verde. Este será abordado mais adiante no livro.

No mundo da energia, existem diversas formas de acumular eletricidade para ser utilizada posteriormente. Um dos métodos mais simples e conhecidos é o uso de baterias. Elas possuem capacidades de energia não tão grandes e são utilizadas em valores baixos de potência, geralmente referenciados em torno de 1 hora.

Nessa figura que estamos analisando, a circunferência que representa as baterias tem um raio muito grande, pois existem diversos tipos de baterias, desde pilhas até aquelas de maior duração e tamanho.

As baterias são um método antigo de armazenamento de eletricidade. No início do desenvolvimento dos automóveis elétricos, as baterias eram utilizadas como fonte de energia, mas acabaram não se popularizando devido à baixa capacidade de acumulação de energia. Em seu lugar, foram utilizados os combustíveis líquidos nos motores de combustão interna.

Baterias



- Sistema de armazenagem de energia ELÉTRICA mais antigo;
- Eletricidade » Química » Eletricidade
- Sistema eletroquímico
- Potência baixa

Figura 36: BATERIAS. Fonte: Notas de aula, 2023.

Existem ainda outras formas de baterias, como os supercapacitores e as *Flow Batteries*, que trabalham com temperaturas elevadas. Esses sistemas de bateria são muito visados hoje em dia, pois são considerados uma forma imediata e simples de acumulação de eletricidade, além de serem bastante conhecidos e utilizados em nosso dia a dia.

O Hidrogênio Verde é uma tecnologia que busca soluções para a transição energética e redução das emissões de gases de efeito estufa. Dentre as possibilidades de armazenamento de energia, as baterias são uma das opções mais comuns e conhecidas. No entanto, existem outras formas de acumulação de energia, como a acumulação mecânica.

Um exemplo disso é a usina hidrelétrica reversível, já utilizada no Brasil desde 1930. Nesse tipo de usina, é possível armazenar água nas turbinas quando há sobra de energia eólica ou solar, por exemplo.

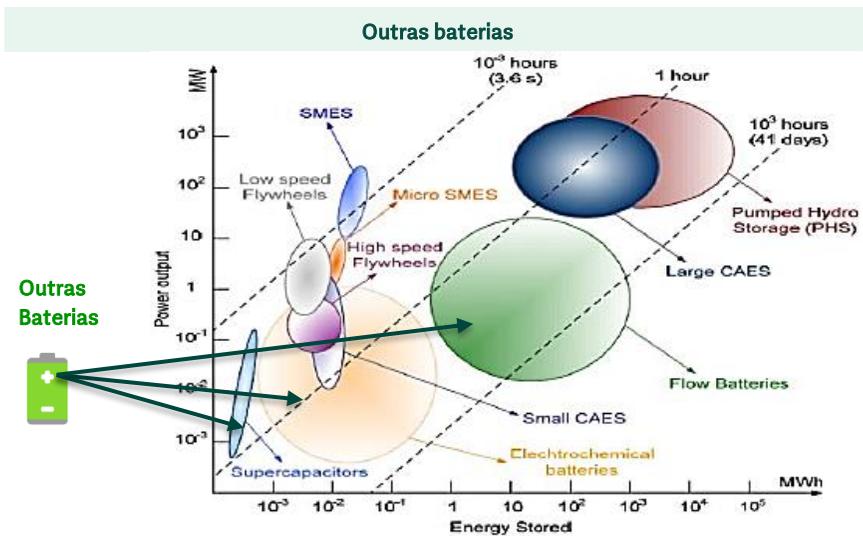


Figura 37: Outras Baterias.

Fonte: Energy Storage: Technologies and Applications. Rijeka, Croatia. InTec

Outra forma de armazenamento eletroquímico que está em desenvolvimento é o uso de baterias de Hidrogênio Verde. Elas funcionam a partir da eletrólise da água, gerando hidrogênio que pode ser armazenado e utilizado para gerar energia elétrica posteriormente.

No caso dos automóveis elétricos da Tesla, a ideia inicial era ter uma bateria sobre rodas que pudesse ser carregada em locais com energia disponível ou barata, podendo alimentar não apenas o carro, mas também a casa da pessoa. Essa é uma forma interessante de pensar em soluções integradas de armazenamento e uso de energia renovável. O armazenamento de energia é um desafio importante para as fontes renováveis, já que a sua produção pode não coincidir com a demanda de consumo.

No entanto, existem várias tecnologias que podem ser utilizadas para armazenar essa energia. Uma delas é a usina hidrelétrica reversível, que é capaz de armazenar energia em forma de água.

Quando há energia disponível na rede, a máquina funciona como bomba, pegando água do reservatório inferior e levando-a para o reservatório superior, armazenando assim energia potencial.

Quando há necessidade de colocar energia de volta na rede, a água é liberada e, ao passar pela turbina, gera energia elétrica que é enviada para a rede.

Usinas reversíveis: Mecânico

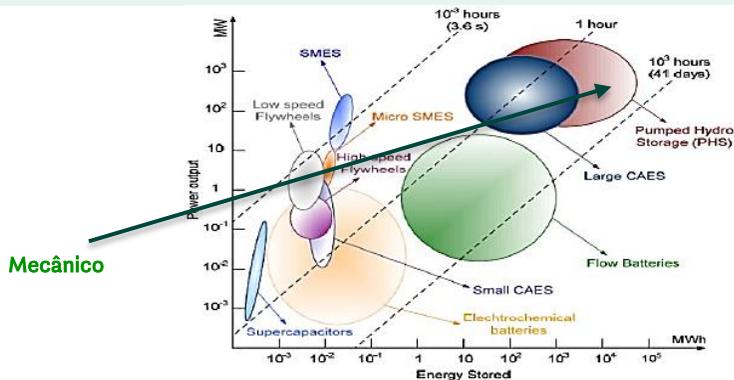


Figura 38: Usinas reversíveis. Outras Baterias.

Fonte: Zoba, A.F. (2013). *Energy Storage: Technologies and Applications*. Rijeka, Croatia. InTec

Essa tecnologia pode ser utilizada em locais que já possuem hidrelétricas disponíveis. Um exemplo é uma usina na Suíça que foi inaugurada recentemente com alto valor de acumulação. Outros locais utilizam o derretimento da neve nas montanhas para ter água em cima, que pode ser levada para baixo e, depois, retornar para cima, gerando energia elétrica por meio de uma usina reversível.

Usinas reversíveis: Mecânico

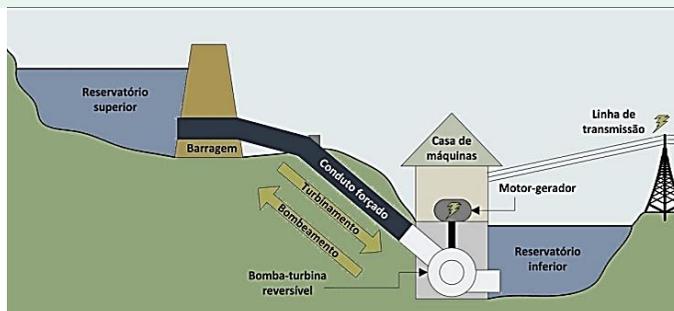


Figura 39: Usinas reversíveis: Mecânico. Fonte: <https://cbie.com.br/>

No entanto, uma alternativa promissora é o uso do Hidrogênio Verde como forma de armazenamento de energia. Isso ocorre porque, além de

ser uma fonte renovável de energia, ele pode ser armazenado e transportado com facilidade, permitindo que a energia gerada em um local possa ser utilizada em outro local. Além disso, a utilização de Hidrogênio Verde não emite gases poluentes, contribuindo para um ambiente mais saudável.

O sistema da figura a seguir teve sua origem na Alemanha e foi criado para ser utilizado em usinas nucleares. O objetivo é fazer com que todo o sistema funcione primeiramente com potências elevadas, para depois trabalhar com as reações nucleares. No entanto, este sistema também pode ser utilizado para armazenar energia de forma limpa e sustentável, através do Hidrogênio Verde.

A configuração que você está vendo é uma turbina a gás, que funciona através da compressão do ar, gerando trabalho no eixo, e posterior expansão quando o combustível é queimado nas turbinas de exaustão. Porém, este sistema tem uma particularidade: ele interrompe o circuito, criando um lado de compressão e um lado de expansão.

A partir disso, os compressores são motorizados com energia elétrica da rede, comprimindo o ar a cerca de 90 a 100 atmosferas e armazenando-o em um reservatório subterrâneo gigantesco, que pode chegar a ter até 1.000 metros de profundidade e ser construído na rocha ou no sal, dependendo da configuração geológica do local.

Esses reservatórios são estanques e garantem a estanqueidade do ar comprimido durante muito tempo.

Quando necessário, é possível liberar o ar comprimido, adicionando gás natural ou outro combustível para que as turbinas voltem a funcionar como uma turbina a gás, porém desacoplada. Esse sistema é chamado de CAES (*Compressed Air Energy Storage*) e é mais comum do que se imagina, existindo diversas plantas CAES no mundo.

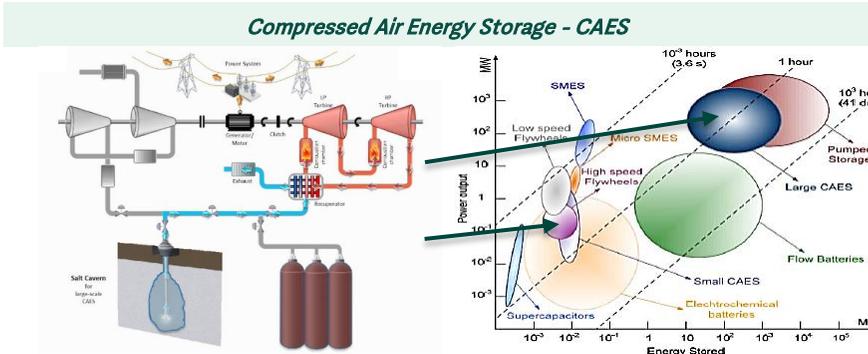


Figura 40: Compressed Air Energy Storage - CAES.

Fonte: Zoba, A.F. (2013). *Energy Storage: Technologies and Applications*. Rijeka, Croatia. InTec

Embora seja necessário um grande investimento para construir um reservatório de ar comprimido dessa magnitude, esta é uma forma mecânica de acumular energia limpa e sustentável, uma vez que o combustível utilizado pode ser o Hidrogênio Verde.

Uma das tecnologias utilizadas para armazenamento de energia no contexto do Hidrogênio Verde é a roda de inércia, também conhecida como *flywheel*.

Essa tecnologia consiste em utilizar a energia disponível, no caso a elétrica, para acionar um motor que faz girar um volante de inércia.

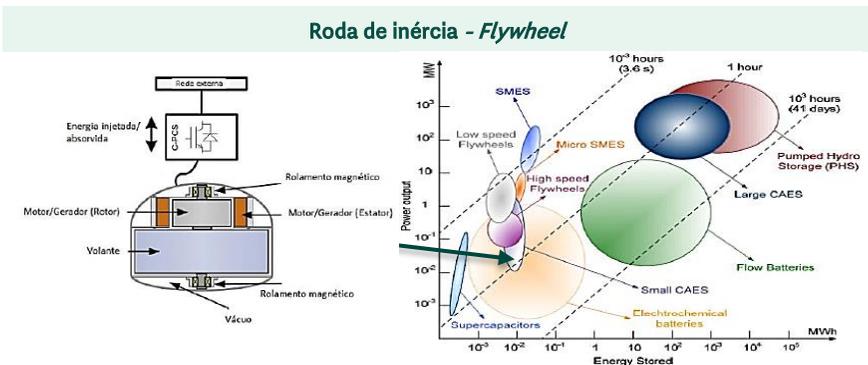


Figura 41: Fonte: Zoba, A.F. (2013). *Energy Storage: Technologies and Applications*. Rijeka, Croatia. InTec

Quando esse volante atinge uma determinada rotação, o ar é encapsulado e o sistema é apoiado em rolamentos de altíssimo

desempenho para evitar o atrito. Dessa forma, a ideia é que o sistema entre em movimento com baixíssimo atrito e possa armazenar energia.

Quando a energia armazenada na roda de inércia precisa ser utilizada, é possível utilizar o mesmo motor como freio. O sistema utiliza um freio magnético que converte energia mecânica em eletricidade e devolve à rede elétrica. Essa tecnologia já é utilizada na Fórmula 1 para recuperar energia durante a frenagem e utilizá-la posteriormente para acelerar o carro em momentos necessários. Além disso, já existem caminhões que utilizam tecnologias semelhantes.

Apesar de não ser uma tecnologia recente, a roda de inércia possui uma capacidade de resposta muito rápida e pode devolver altas potências, mesmo que não acumule tanta energia. No entanto, é importante destacar que o sistema não é indicado para longas durações de armazenamento de energia devido ao atrito.

A seguir, apresentamos uma organização para armazenamento de energia, separando o armazenamento elétrico do térmico. São tecnologias diferentes e podemos perceber que há mais opções para o elétrico do que para o térmico, o que mostra a crescente importância da energia elétrica nos sistemas.

Dentre as opções de armazenamento químico correlacionado ao elétrico, encontramos os biocombustíveis de forma geral e o hidrogênio, utilizado como armazenamento químico devido à sua capacidade de armazenamento em moléculas. A maior parte do hidrogênio é produzida por eletrólise.

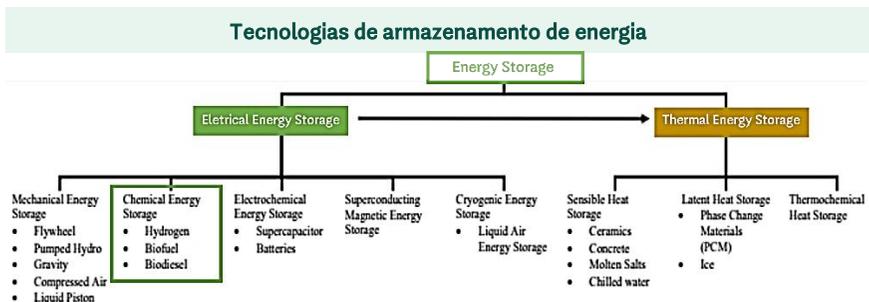


Figura 42: Fonte: Aneke and Wang, 2016. *Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. Applied Energy*

Para avaliar o desempenho de sistemas de acumulação, existem vários parâmetros importantes, sendo a densidade de energia um conceito-chave. A densidade de energia indica a quantidade de energia disponível por unidade de massa ou volume. O hidrogênio é o combustível com maior densidade energética, o que o torna um recurso valioso para armazenamento de energia.

Quando pensamos em sistemas complexos, é importante considerar a vida útil dos componentes. No caso de baterias, pilhas e outros dispositivos, a duração é uma métrica importante.

Custo de capital e custo de operação são dois aspectos importantes a serem considerados na viabilidade de um sistema de Hidrogênio Verde. O custo operacional baixo pode resultar em um custo de capital alto e vice-versa. No entanto, quando ambos os custos são elevados, o sistema não é viável. É comum haver uma compensação entre esses dois aspectos.

A duração é um fator crítico para sistemas de armazenamento de energia, como as baterias recarregáveis. É importante considerar a capacidade de armazenamento e quanto tempo essa energia pode ser armazenada sem perda.

Um fator importante para as baterias é o tempo de ciclo, que é o tempo de ida e volta da energia. A eficiência de ida e volta é um parâmetro importante para avaliar a eficiência do sistema de armazenamento de energia.

Não é possível ter eficiência acima de 100%, mas uma eficiência de 90% é um bom número. É importante comparar diferentes sistemas de armazenamento de energia para escolher o melhor para cada aplicação.

O tempo de resposta é outro fator importante a ser considerado. É necessário ter potência suficiente para recuperar a energia armazenada em mW/h. A maturidade tecnológica também é importante. Existem várias baterias em desenvolvimento que ainda não são maduras e apresentam riscos de explosão ou incêndio.

É importante considerar a segurança e o impacto ambiental dos sistemas de armazenamento de energia. Mesmo aqueles que

aparentemente são bem-comportados podem ter impactos ambientais significativos, como no caso da hidroeleticidade que requer a construção de reservatórios, causando impactos ambientais e sociais.

Por fim, é importante avaliar os riscos envolvidos no sistema de armazenamento de energia. Os riscos ambientais e sociais devem ser levados em consideração, e medidas adequadas devem ser tomadas para minimizar esses riscos.

Vamos falar sobre a produção de hidrogênio como combustível. É importante destacar que o hidrogênio não existe livre na natureza para o seu uso como combustível. Existem exceções em que é possível obter hidrogênio, mas esses casos não são significativos em termos comerciais e de engenharia. Dessa forma, é necessário transformar outras substâncias em hidrogênio para que ele possa ser utilizado como combustível.

A *International Renewable Energy Agency* (IRENA) fez a imagem abaixo, sobre o mapeamento da cadeia de hidrogênio até 2050:

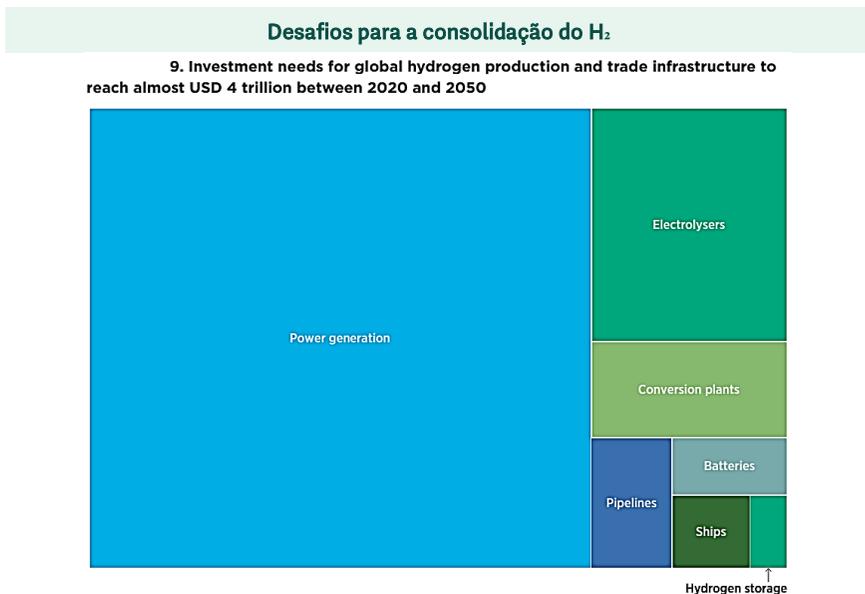


Figura 43: Desafios para a consolidação do H₂. Fonte: IRENA (2022), *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

O mapeamento que a produção de energia é o ponto central para alcançar uma cadeia de hidrogênio estabelecida. É preciso ter muita eletricidade ou outras fontes de energia para produzir hidrogênio.

Podemos observar, que a eletrólise e os eletrolisadores são pontos muito importantes na produção de hidrogênio.

A eletrólise é o processo de decomposição da água em hidrogênio e oxigênio por meio da passagem de corrente elétrica. Esse processo requer uma grande quantidade de eletricidade, por isso a geração de energia é tão importante na produção de hidrogênio.

Além disso, a imagem também destaca a importância das plantas de conversão, distribuição, baterias e carregamento em navios para a cadeia de hidrogênio. Por fim, podemos observar que o investimento em geração de energia é o ponto de partida para a cadeia de hidrogênio. É preciso ter muita atenção e esforço na produção de energia para que a cadeia de hidrogênio possa ser estabelecida.

2.1. Onde procurar a informação?

O Hidrogênio Verde é uma forma de produzir energia limpa e renovável, que tem ganhado cada vez mais atenção no mundo todo. Para entender melhor sobre essa fonte de energia, é importante buscar informações confiáveis e atualizadas.

Existem diversos sites e organizações que fornecem dados e estatísticas sobre o Hidrogênio Verde, mas é preciso ter cuidado para selecionar fontes confiáveis. Entre as organizações mais relevantes para buscar informações sobre a produção de energia verde no Brasil, destaca-se o PNE (Plano Nacional de Energia) e o balanço energético nacional, que é produzido pela empresa de pesquisa energética vinculada ao Ministério de Minas e Energia.

Além disso, a Agência Internacional para Energia Renováveis (IRENA) e o Conselho de Energia Mundial também são fontes importantes de informação sobre energia limpa e renovável, incluindo o Hidrogênio Verde. A IEA (Agência Internacional de Energia) também possui dados relevantes para quem trabalha com energia, incluindo apresentações com gráficos dinâmicos.

Para entender melhor sobre o Hidrogênio Verde e como ele pode ser utilizado como fonte de energia limpa e renovável, é recomendável explorar esses sites e organizações em busca de informações relevantes e atualizadas.

Assim, será possível entender melhor sobre as vantagens e desvantagens dessa fonte de energia e como ela pode ser utilizada de forma eficiente para reduzir a emissão de gases de efeito estufa e contribuir para a sustentabilidade do planeta.

3. Matriz energética e elétrica mundial e brasileira

Vamos agora abordar a matriz energética brasileira e mundial. É importante analisar a matriz energética e elétrica, e estudar os dados para compreender onde o Hidrogênio Verde se encaixa nesse contexto.

No contexto da matriz energética chinesa, vale lembrar que ela não é composta apenas por eletricidade, mas também por calor e combustíveis. O gráfico a seguir apresenta a participação de cada tipo de combustível na formação da matriz energética ao longo dos anos, desde a década de 1990 até o momento atual.

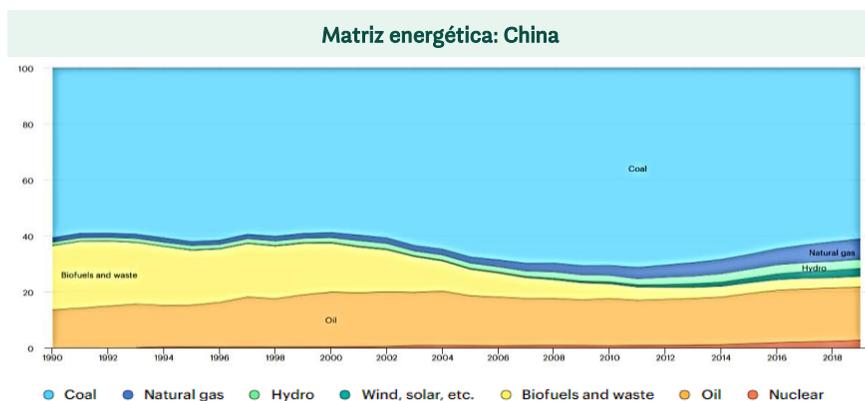


Figura 44: Matriz energética da China. Fonte: (IEA, 2022).

É notável a presença significativa do carvão, que representa cerca de 60% da matriz energética da China. O carvão é considerado um dos primeiros combustíveis fósseis e possui reservas confirmadas para mais de 500 anos. Além disso, a indústria baseada no carvão é antiga e bem

estabelecida. Apesar disso, observa-se uma diminuição da participação de biocombustíveis e rejeitos, bem como um aumento do gás natural.

Geopoliticamente, há uma chance de que o gás natural aumente ainda mais sua participação na matriz energética chinesa, principalmente se a Rússia interromper o fornecimento do gás natural para o Ocidente e o redirecionar para a China, tornando-o mais barato.

O petróleo também é uma fonte de energia importante na matriz chinesa, com grande parte sendo importada da Rússia, que se tornou um parceiro preferencial na área de energia. A matriz energética dos Estados Unidos tem passado por mudanças significativas nos últimos anos. A participação do carvão, fonte de energia altamente poluente, tem diminuído desde o governo Obama, que assinou protocolos para a proteção do meio ambiente.

Infelizmente, esses protocolos foram desrespeitados pelo governo Trump, que tinha a indústria do carvão como um forte aliado político.

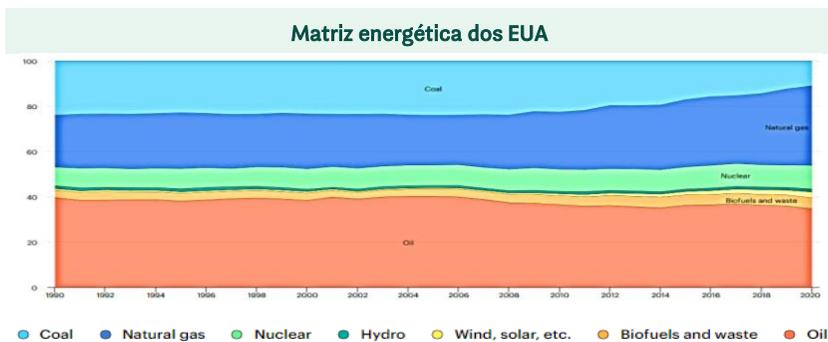


Figura 45: Matriz energética dos EUA. Fonte: (IEA, 2022).

No entanto, a matriz americana ainda é composta por uma grande participação do gás natural, explorado tanto nos Estados Unidos como no Canadá. Além disso, o gás natural proveniente do fraturamento hidráulico, que consiste na quebra do subsolo para liberar gás natural de rochas, tem impulsionado a indústria americana.

A matriz também tem uma participação significativa de energia nuclear, petróleo e seus derivados. É importante ressaltar que o uso dessas fontes de energia fósseis contribui para o aquecimento global e a

degradação do meio ambiente. Por isso, é necessário investir em fontes de energia limpas e renováveis, como o Hidrogênio Verde, para garantir um futuro sustentável.

A Alemanha, por exemplo, enfrenta uma tragédia energética devido à sua forte dependência do carvão, reduzida ao longo do tempo em virtude das mudanças climáticas.

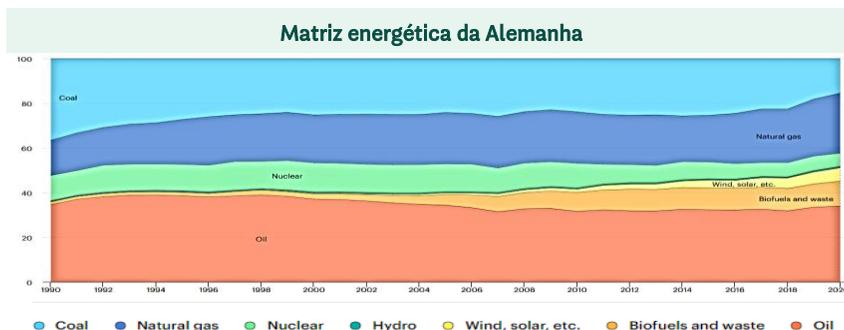


Figura 46: Matriz energética da Alemanha. Fonte: (IEA, 2022).

Como uma alternativa, o gás natural foi utilizado para fazer a transição energética, juntamente ao aumento da energia solar e eólica.

Embora o investimento nessas fontes de energia esteja crescendo, é importante notar que essas participações são relativas, e não absolutas. É necessário aumentar ainda mais o investimento nessas fontes, juntamente à introdução de outras fontes de energia, como biocombustíveis e rejeitos, para que a transição energética seja bem-sucedida.

Os rejeitos, em particular, são uma fonte importante de energia para as comunidades locais. A queima de resíduos sólidos urbanos é comum em usinas de produção de eletricidade de 30 MW ou 40 MW. Isso é uma coisa muito comum e é a energia que se coloca na rede.

A energia nuclear, por outro lado, enfrenta muitos problemas na Europa depois do acidente em Fukushima. Os plebiscitos e manifestações populares votaram contra o uso da energia nuclear, o que resultou no desligamento de várias usinas nucleares na Europa. No entanto, com o corte do fornecimento de gás natural pela Rússia, a Europa enfrenta um grande desafio para substituir o combustível.

Uma opção para a substituição é o Hidrogênio Verde. O Brasil é visto como um grande potencial produtor de hidrogênio devido à abundância de sol. O hidrogênio pode ser exportado para a Europa e distribuído através dos sistemas de gás natural existentes. Essa é uma das maneiras pelas quais o Hidrogênio Verde pode ser introduzido na matriz energética da Alemanha.

No entanto, a sua introdução na matriz energética requer muitos desafios a serem superados. A produção de hidrogênio é um processo que exige muita energia e é necessário garantir que a produção seja sustentável e econômica. Além disso, a infraestrutura para o armazenamento e distribuição de hidrogênio ainda precisa ser desenvolvida.

Apesar dos desafios, o Hidrogênio Verde apresenta uma oportunidade para a Europa, especialmente no que diz respeito à calefação no inverno. Com o seu uso, a Europa pode superar a tragédia energética que enfrenta e alcançar uma transição energética bem-sucedida.

A França é conhecida por ter uma matriz energética bastante peculiar. Ela é baseada principalmente na energia nuclear, que foi uma decisão do Estado francês tomada nos anos 1960.

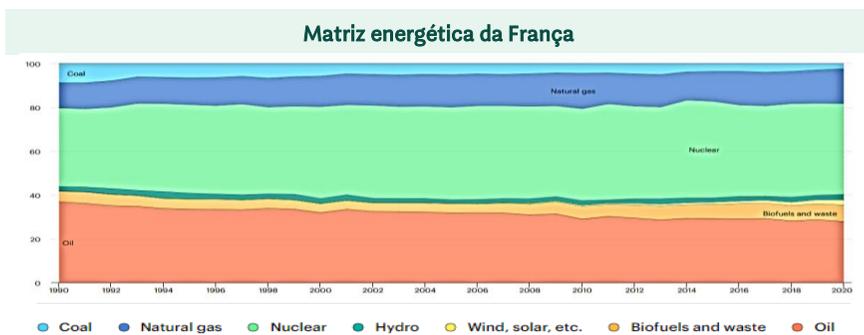


Figura 47: Matriz energética da França. Fonte: (IEA, 2022).

Diferente da Alemanha, onde a energia nuclear foi descontinuada, na França ela vingou, e o país é um grande exportador de energia elétrica. Além da nuclear, eles têm uma dependência significativa de gás natural, mas praticamente não utilizam carvão. Na verdade, quem trabalha com carvão na França é formado fora do país, inclusive no Brasil.

Se olharmos para a matriz energética francesa, percebemos que ela é muito pouco verde, uma vez que é baseada principalmente em fontes não renováveis, como nuclear, gás natural, petróleo e, em menor escala, resíduos. Não há grande participação de fontes renováveis, como biocombustíveis ou Hidrogênio Verde, o que pode ser um ponto a ser repensado no futuro.

A Índia é um país com uma população enorme, semelhante à da China, com cerca de 1,3 bilhões de habitantes. Sua matriz energética é muito concentrada em carvão e petróleo, o que é um grande desafio para a transição para uma economia mais verde.

No entanto, é impressionante a participação dos biocombustíveis, dada a sua enorme população. O uso do carvão é um problema importante para a Índia, uma vez que é uma fonte de energia altamente poluente e contribui para a mudança climática.

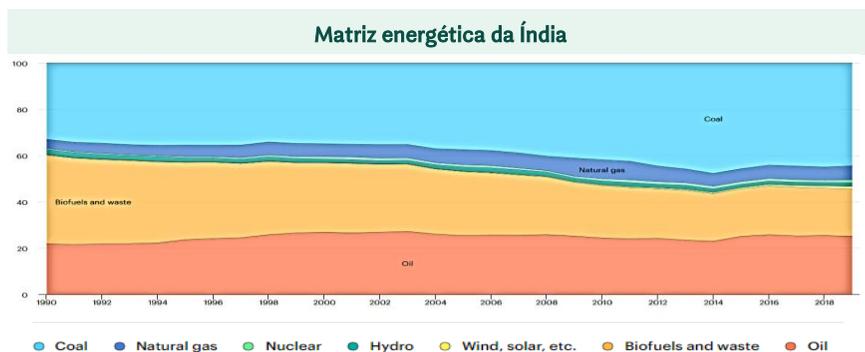
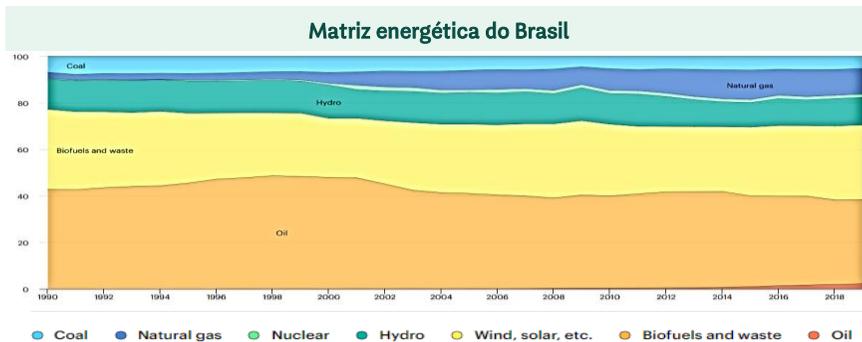


Figura 48: Matriz energética da Índia. Fonte: (IEA, 2022).

A adoção de fontes de energia mais limpas, como o Hidrogênio Verde, pode ser uma solução para a Índia reduzir sua dependência do carvão e avançar em direção a uma economia mais sustentável.

No Brasil, a matriz energética é bem diversificada, mas há uma grande dependência do petróleo, principalmente no setor de transporte. Infelizmente, o país tem um sistema rodoviário muito utilizado, em detrimento de opções mais inteligentes, como o transporte marítimo e ferroviário, que ainda são pouco explorados. Como resultado, todos os setores, incluindo o escoamento de mercadorias, dependem dos

derivados de petróleo. Apesar disso, o Brasil possui uma grande participação de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel.



Além disso, a energia gerada pela hidrelétrica é uma fonte importante em nossa matriz energética. O gás natural também é bastante utilizado, assim como a lenha em algumas regiões.

Embora o gráfico apresentado anteriormente, incluía a energia nuclear, é importante notar que esses dados não são específicos do Brasil, mas sim da Agência Internacional de Energia.

No entanto, o Brasil tem um grande potencial para a produção de Hidrogênio Verde, especialmente por causa de seu clima favorável e recursos naturais abundantes. O uso do Hidrogênio Verde poderia ajudar a diversificar ainda mais a matriz energética brasileira e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

A matriz energética do Brasil é motivo de destaque no mundo por ser uma das mais renováveis. Cerca de metade da matriz energética do país é composta por fontes renováveis, enquanto no mundo, de forma geral, a maior parte é não renovável.

Essa proporção de 50% de renováveis foi alcançada em 2022, mas em anos anteriores já tivemos uma matriz mais verde do que a atual. Um dos fatores que contribuiu para essa queda foi a estiagem dos últimos anos, que diminuiu a disponibilidade de hidroeletricidade, levando ao aumento do uso de gás natural para compensar.

Matriz energética Brasil x Mundo

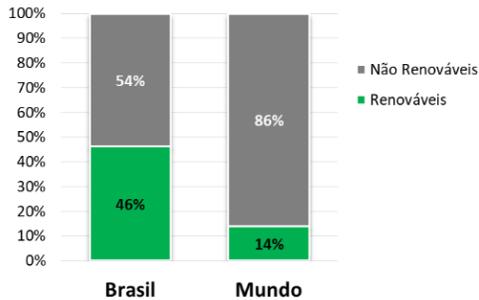


Figura 50: Matriz energética Brasil x Mundo. Fonte: (EPE, 2022).

Vamos falar agora sobre matriz elétrica, mais especificamente sobre a China. O processo de conversão de energia para eletricidade é o que chamamos de eletrificação. É quando utilizamos eletricidade em vez de combustíveis como lenha, carvão e gás natural para queima. O sistema é diferente.

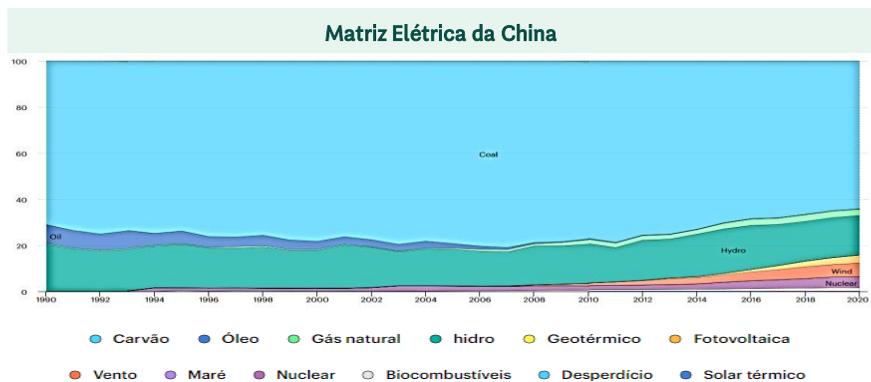


Figura 51: Matriz Elétrica da China Fonte: (IEA, 2022).

A China é muito dependente do carvão. Eles têm uma grande quantidade de carvão, e a Austrália, relativamente perto, vive da produção de carvão de alta qualidade. No entanto, há um movimento para reduzir o seu uso e aumentar o uso de energia hidrelétrica, eólica, solar e nuclear.

O petróleo e seus derivados praticamente não são mais utilizados para a produção de eletricidade na China. Isso mostra uma mudança na matriz energética do país, com uma maior preocupação em utilizar fontes renováveis. A eletrificação é um processo importante para

diminuir a dependência de combustíveis fósseis e avançar rumo a uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Os Estados Unidos têm diminuído sua dependência do carvão, mas ainda dependem fortemente do gás natural e da energia nuclear.

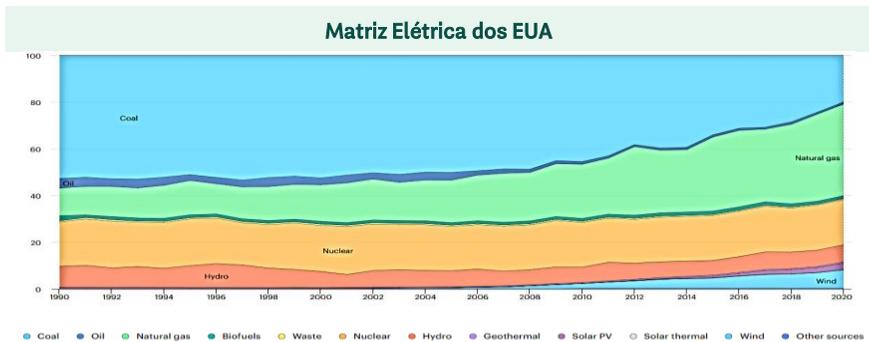


Figura 52: Matriz Elétrica dos EUA Fonte: (IEA, 2022).

Esses dois recursos são a base da produção de eletricidade no país. Apesar de terem um grande esforço na eletrificação, ela não será verde e sim baseada em carvão, gás natural e nuclear, com uma pequena contribuição da energia hidrelétrica.

O uso de fontes renováveis tem aumentado gradualmente, mas ainda representa apenas 20% da matriz energética americana. No entanto, com o desenvolvimento do Hidrogênio Verde e outras tecnologias limpas, há uma oportunidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis e avançar em direção a uma matriz energética mais sustentável.

A matriz energética da Alemanha está passando por mudanças significativas, com a redução da dependência de fontes de energia não renováveis, como o carvão e a energia nuclear. Em seu lugar, a energia eólica e solar têm ganhado cada vez mais espaço, o que reflete a tendência global.

No entanto, uma das preocupações é que, com a expansão das fontes intermitentes de energia, como a solar e a eólica, a matriz energética pode ficar mais instável.

Imagine, por exemplo, se metade da energia gerada na Alemanha provém de fontes intermitentes, como a solar e a eólica, cuja produção depende das condições climáticas.

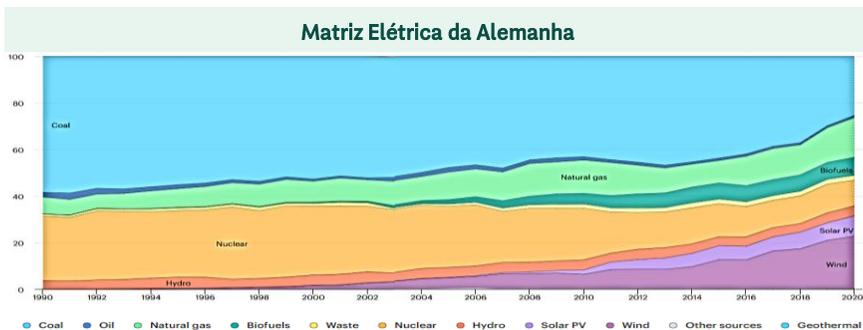


Figura 53: Matriz Elétrica da Alemanha. Fonte: (IEA, 2022).

Será necessário desenvolver soluções para garantir a estabilidade da matriz energética e a oferta de energia constante, como o armazenamento de energia e o desenvolvimento de tecnologias para a produção de Hidrogênio Verde.

Vamos falar sobre o papel da energia nuclear na França. É importante destacar que este país possui uma matriz elétrica em que a energia nuclear tem um papel gigante e isso não deve mudar tão cedo.

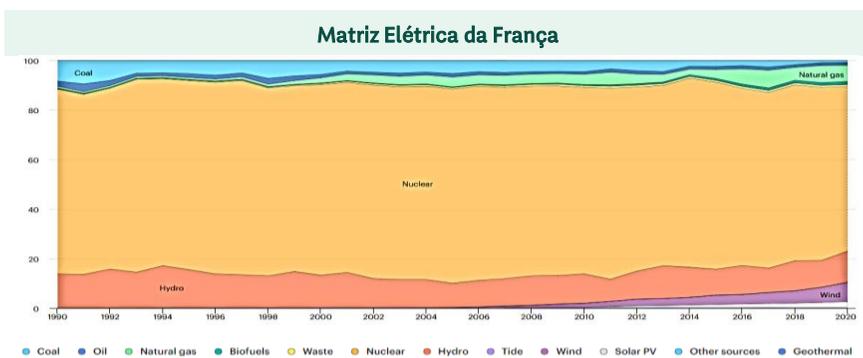


Figura 54: Matriz Elétrica da França. Fonte: (IEA, 2022).

A França é um dos países que mais investe em energia nuclear no mundo, com uma produção de eletricidade que chega a mais de 70% do total gerado. A energia nuclear é gerada a partir da fissão de átomos de urânio, um elemento abundante no planeta.

Entretanto, a produção de energia nuclear também possui seus riscos e desafios, como o armazenamento dos resíduos radioativos gerados, que são altamente perigosos e devem ser tratados com muito cuidado para evitar acidentes e contaminações.

Na Índia, a matriz energética é majoritariamente baseada em combustíveis fósseis, especialmente no carvão.

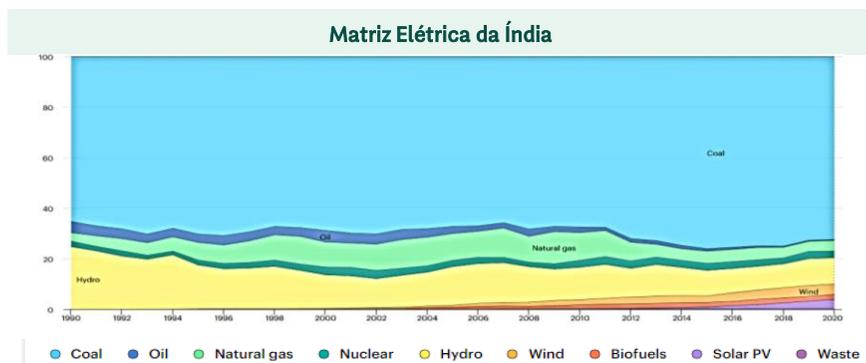


Figura 55: Matriz Elétrica da Índia. Fonte: (IEA, 2022).

No entanto, a Índia tem feito grandes avanços na adoção de fontes renováveis, como energia eólica e solar, embora a hidroeletricidade esteja perdendo importância. Mesmo assim, o carvão ainda é a maior fonte de energia do país, que possui uma população muito grande e em constante crescimento.

A transição para uma matriz energética mais verde é um desafio importante para a Índia, mas também é uma necessidade urgente para garantir um futuro sustentável.

Já o Brasil é um país que tem como matriz energética uma grande participação da energia hidrelétrica, que já chegou a ser responsável por 95% da produção de eletricidade nos anos 1990.



Figura 56: Matriz elétrica Brasil x Mundo Fonte: (EPE, 2022).

Porém, ao longo do tempo, essa participação tem diminuído, o que é preocupante. O biocombustível, incluindo o biogás, é uma fonte de energia renovável que tem um grande potencial para ser explorado no Brasil, já que o país é uma potência agropecuária.

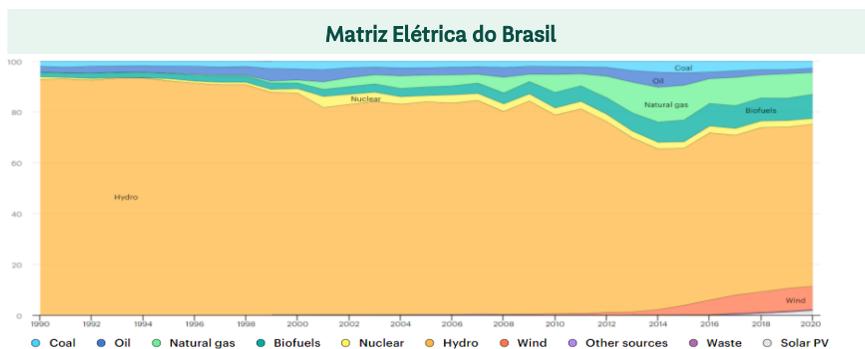


Figura 57: Matriz Elétrica do Brasil. Fonte: (IEA, 2022).

É possível obter energia elétrica e hidrogênio a partir do biogás através do uso de biorreatores e gaseificadores.

O gás natural também é importante na matriz energética brasileira, especialmente em situações de escassez de água nos reservatórios das hidrelétricas, como ocorreu durante a estiagem severa de dois anos atrás. Já o carvão mantém sua participação mais ou menos constante, e o petróleo é pouco utilizado para a geração de eletricidade.

O Brasil tem um grande potencial de crescimento na geração de energia eólica, o que é muito positivo para o país.

4. Sistema Elétrico Brasileiro (SEB)

O setor elétrico brasileiro tem um papel importante na produção de Hidrogênio Verde. Para entender como isso acontece, é preciso compreender o funcionamento do sistema elétrico.

O Brasil possui uma extensa linha de transmissão de eletricidade, que interliga todo o país, com mais de 173 mil km de linhas em diferentes níveis de tensão. Essa rede é fundamental para o transporte de energia elétrica, que pode ser gerada a partir de diversas fontes, como hidrelétricas, eólicas e solares.

No contexto da produção de Hidrogênio Verde, a eletricidade é a principal fonte de energia para a produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água. Ou seja, a eletricidade é usada para separar as moléculas de água em hidrogênio e oxigênio. Por isso, é importante que a matriz elétrica brasileira seja cada vez mais limpa e renovável, com a expansão de fontes de energia renovável e a redução da dependência de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo.

Em abril de 2022, o Sistema Elétrico Brasileiro – SEB, atingiu 173.509 km de linhas de transmissão em operação (inclui rede básica, conexões de usinas, interligações internacionais e 190 km no sistema isolado de Roraima).

Linhas de transmissão de energia elétrica brasileiro

Classe de Tensão (kV)	Linhas de Transmissão Instaladas (km)	Total (%)
230	64.593	37,2%
345	10.359	6,0%
440	6.859	4,0%
500	66.996	38,6%
600 (CC)	12.816	7,4%
750	2.683	1,5%
800 (CC)	9.204	5,3%
TOTAL	173.509	100%

Figura 58: Linhas de transmissão de energia elétrica brasileiro. Fonte: (MME, 2022)

Deste total, 47,2% correspondem às classes de tensão entre 230 kV até 440 kV e 52,8% correspondem às classes de tensão entre 500 kV e 800 kV (MME, 2022).

Trata-se de uma ligação continental que permite a distribuição de eletricidade por todo o território brasileiro.

Essa rede é fundamental para a disseminação de fontes renováveis de energia, como a eólica e a solar, que podem ser geradas em regiões remotas do país e transmitidas para as regiões que mais necessitam de energia.

Além disso, a rede também é importante para a integração de sistemas de armazenamento de energia, como baterias e Hidrogênio Verde, que podem ajudar a equilibrar a oferta e a demanda de energia em diferentes momentos do dia.

Portanto, é fundamental que essa rede de transmissão continue sendo desenvolvida e modernizada, para que possa acompanhar as mudanças na matriz energética do país e contribuir para um futuro mais sustentável.

É previsto para 2024 a operação de mais 16.997 km de linhas de transmissão conforme é possível ver na tabela abaixo, ou seja, um aumento de quase 10% em dois anos do valor atual.

Previsão de expansão de novas linhas de transmissão			
Classe de Tensão (kV)	Previsão 2022 (km)	Previsão 2023 (km)	Previsão 2024 (km)
230	1.806,9	3.097,2	299,1
345	522,2	207,0	237,5
440	37,0	61,0	0,0
500	4.130,0	3.071,0	3.228,0
TOTAL	6.496,1	6.436,1	3.764,6

Figura 59: Previsão de expansão de novas linhas de transmissão.
Fonte: (MME, 2022)

Atualmente, o mundo está em busca de soluções mais sustentáveis e o Hidrogênio Verde tem se destacado como uma fonte de energia limpa e renovável.

No plano mencionado, há uma previsão de aumento de cerca de 10% da capacidade atual em dois anos, o que representa um crescimento superior ao do Produto Interno Bruto (PIB) esperado para o mesmo período. Isso mostra a importância da energia para o desenvolvimento econômico e como ela deve ser uma prioridade na agenda de qualquer país.

O Hidrogênio Verde pode ser uma peça-chave nessa busca por uma energia mais sustentável. Ele é produzido a partir da eletrólise da água, usando energia renovável, como a solar ou eólica. Além disso, sua combustão não emite gases poluentes, contribuindo para a redução da pegada de carbono.

Portanto, é essencial que os países invistam em tecnologias para produzir Hidrogênio Verde e expandir sua capacidade de produção de energia elétrica. Dessa forma, poderão garantir um desenvolvimento econômico sustentável e mais respeitoso com o meio ambiente.

O Brasil tem um dos maiores sistemas interligados do mundo em que a geração e o despacho da energia elétrica podem garantir o suprimento entre os subsistemas.

Lembrando, MWmed - Megawatt médio - $1 \text{ MWmed-ano} = 8.760 \text{ MWh/ano}$ (energia média no intervalo de tempo considerado)

O sistema elétrico brasileiro é composto por regiões interligadas, sendo a região Sudeste/Centro-Oeste a mais importante, com São Paulo como o maior consumidor. Embora o Brasil produza eletricidade para abastecer principalmente a região Sudeste, há excedentes que são distribuídos para outras regiões, como o Sul.

É importante destacar que o Hidrogênio Verde pode se beneficiar desse sistema, já que a eletricidade produzida em excesso pode ser utilizada para a produção de hidrogênio, ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes.

Estados como Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás têm uma população de cerca de 10 milhões de habitantes, predominantemente agrícola, e com pouca demanda industrial.

São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais são os principais estados produtores e consumidores de energia elétrica do Brasil.

Mapa dos intercâmbios dos subsistemas do SIN

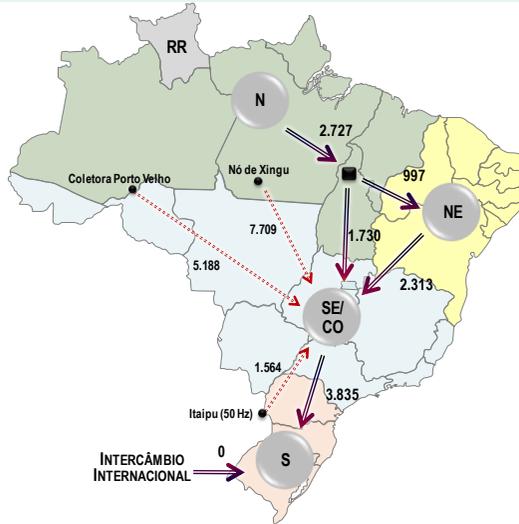


Figura 60: Mapa dos intercâmbios dos subsistemas do SIN.
Fonte: (MME, 2022)

A figura a seguir aborda a questão da interligação elétrica no Brasil.

Evolução da transmissão brasileira de 1960 a 2027

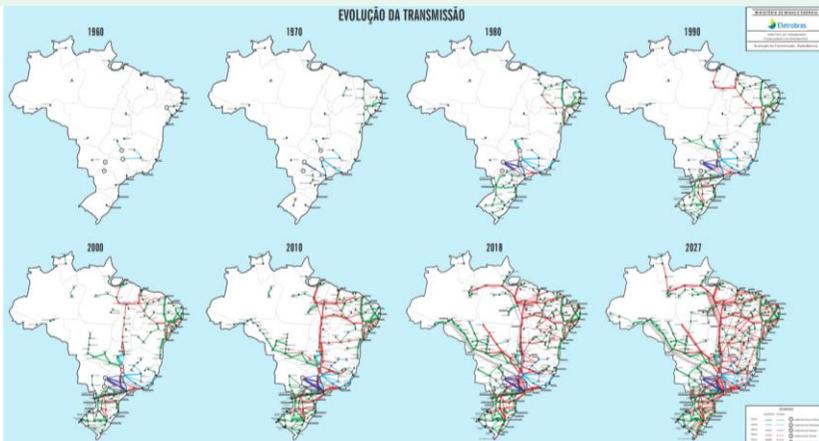


Figura 61: Fonte: (MME, 2022)

Desde os anos 1960, tínhamos uma situação de interligação elétrica muito limitada no país, mas a situação mudou bastante em 2018, quando boa parte do país já estava interligada.

Isso é algo para nos orgulharmos, já que poucos países do mundo têm essa característica.

Os Estados Unidos, por exemplo, não chegam nem perto disso. Na Europa, embora haja uma interligação elétrica, ela não é tão ampla como a nossa, pois são países que compõem a Europa. Os Estados Unidos têm problemas de estados que são completamente isolados uns dos outros, mas nós não temos essa situação.

A interligação elétrica é importante porque permite a troca de energia elétrica entre as diversas regiões do país, o que aumenta a segurança energética e a eficiência do sistema elétrico como um todo.

Além disso, a interligação pode ajudar a reduzir os custos de transmissão de energia elétrica, o que pode beneficiar os seus consumidores. É importante ressaltar que a expansão da interligação elétrica deve ser acompanhada por investimentos em outras fontes de energia, como o Hidrogênio Verde, para garantir que tenhamos um sistema elétrico seguro, eficiente e sustentável no longo prazo.

O setor elétrico brasileiro apresenta uma grande interconexão entre as diferentes regiões do país. São mais de 173 mil km de linhas de transmissão que interligam todas as regiões e praticamente formam uma ligação continental.

A maior concentração de demanda de energia está na região Sudeste, com São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais sendo os estados que mais demandam energia elétrica. Além disso, o sistema elétrico brasileiro é muito eficiente e tem uma geração com resposta rápida, principalmente devido às hidrelétricas.

Uma possibilidade de interação para lidar com a fronteira com a Venezuela em Roraima pode representar uma alternativa interessante para reduzir a dependência de energia proveniente desse país. É fundamental destacar que o Brasil tem uma matriz energética diferente dos Estados Unidos, caracterizada por uma considerável capacidade de

resposta em termos horários, em contraste com os dois a três dias necessários nos EUA.

No que diz respeito à estrutura do sistema elétrico, é crucial distinguir os ambientes de contratação de energia. Temos a contratação regulada, que engloba a energia que utilizamos em nossas residências, por exemplo.

Consumo de energia no Brasil estratificação por classe								
Classe de Consumo	Valor Mensal					Acumulado 12 meses		
	Jun/21 GWh	Mai/22 GWh	Jun/22 GWh	Evolução mensal (Jun/22/Mai/22)	Evolução anual (Jun/22/Jun/21)	Jul-20/Jun-21 (GWh)	Jul-21/Jun-22 (GWh)	Evolução
Residencial	12.000	12.283	11.922	-2,9%	-0,6%	152.076	151.237	-0,6%
Industrial	14.991	15.413	15.127	-1,9%	0,9%	177.699	181.809	2,3%
Comercial	6.781	7.611	7.144	-6,1%	5,4%	84.835	90.994	7,3%
Rural	2.740	2.425	2.436	0,4%	-11,1%	32.039	31.048	-3,1%
Demais classes ¹	3.846	4.265	4.088	-4,1%	6,3%	47.504	49.483	4,2%
Perdas e Diferenças ²	9.033	8.338	7.441	-10,8%	-17,6%	118.368	142.980	20,8%
Total	49.392	50.336	48.159	-4,3%	-2,5%	612.521	647.550	5,7%

Figura 62: Consumo de energia no Brasil estratificação por classe. Fonte: (MME, 2022)

Infelizmente, nesse caso, estamos limitados a contratar energia da concessionária, a qual opera como um monopólio, não tendo livre concorrência na contratação para pequenos níveis de consumo, como o doméstico.

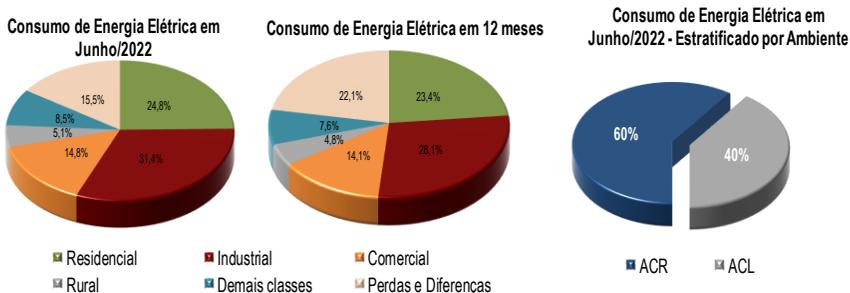
Já o médio e grande consumidor industrial e comercial, podem fazer a contratação no ambiente livre. Normalmente, conseguem valores mais baixos de energia contratada, mas é preciso ter cuidado. Uma vez que se migra para o ambiente livre, dificilmente se consegue retornar. É um processo que exige bastante administração e fica tudo mais sofisticado.

Se olharmos para o consumo brasileiro, notamos que a importância do consumo residencial é a maior, seguido pelo industrial e, em seguida, pelo comercial. Aqui está a grande fatia do consumo brasileiro. O setor rural também tem uma participação, que não é insignificante. Como

estamos falando de um país agrícola, na agroindústria há um consumo interessante nesse setor.

No gráfico a seguir, é perceptível que existe uma porcentagem classificada como “Perdas e Diferenças”, correspondendo a cerca de 14%, um papel significativo no todo. Mas, apesar de ser um valor significativo, é um dado difícil de ser mensurado.

Consumo de energia no Brasil estratificação por classe



- **Contratação Regulada (ACR) (maioria dos clientes)**
- **Contratação Livre (ACL) (normalmente por empresa)**

Figura 63: Consumo de energia no Brasil estratificação por classe. Fonte: (MME, 2022)

É possível observar que as “Perdas e Diferenças” se aproximam do consumo de uma classe inteira. Isso não é algo a ser descartado.

Isso vem da própria característica do sistema interligado, porque na transmissão já há uma perda estimada de cerca de 4%, em média. Se, por exemplo, você tiver que trazer energia do norte para o sul, a perda será maior, pois há uma distância maior para percorrer, o que leva a perdas inerentemente.

O grande vilão na área de distribuição é a baixa qualidade dos sistemas, que são mais diversificados e complexos, e, portanto, mais propensos a falhas do que outros.

Quando você pensa em um sistema de alta tensão, consegue prestar mais atenção ao seu funcionamento. Já na distribuição no varejo, onde a energia chega às casas das pessoas, há muito mais chance de ligações de baixa qualidade.

Além disso, há um problema nacional chamado "gato", que representa uma parcela muito grande de energia consumida de maneira ilegal, a qual não é paga pelos infratores, mas sim por nós em nossas contas de energia.

No ambiente regulado, que é o que nós, consumidores residenciais, temos acesso, só é possível contratar energia da concessionária de energia elétrica, a qual opera como um monopólio.

Já no ambiente livre, empresas e indústrias de médio e grande porte têm a flexibilidade de escolher seus fornecedores de energia elétrica. Geralmente, nesse ambiente é possível conseguir preços mais baixos, mas requer comprovação de certos requisitos e uma gestão energética mais complexa.

No Brasil, a maior fatia do consumo de energia elétrica vem do setor residencial, seguido pelos setores industrial e comercial. O setor rural também tem uma participação importante, já que o país é agrícola e possui muitas indústrias nessa área. No entanto, há ainda as perdas e diferenças, que se aproximam do consumo de uma classe inteira e são um grande desafio para o sistema elétrico, especialmente para o setor de distribuição.

O governo federal incentiva o sistema elétrico regulado por meio de políticas de crescimento. Quando há uma oferta de expansão da geração, leilões de depreciação são realizados para escolher o empreendedor que apostou no menor valor. O período de entrega da energia, definido em contrato, pode variar de 6 a 7 anos, dependendo do edital. Se o empreendedor conseguir entregar a energia antes do prazo, ele pode vender a energia excedente no mercado livre ou com contratos.

Em suma, entender o funcionamento do sistema elétrico é essencial para entender como o Hidrogênio Verde pode representar uma alternativa de energia limpa e sustentável para o futuro.

No sistema elétrico brasileiro, existem áreas isoladas que são atendidas por sistemas isolados, principalmente na Amazônia. Fernando de Noronha e algumas áreas isoladas no Tocantins também são exemplos desse cenário.



Figura 64: Fonte: (MME, 2022)

Características:

- Baixa renda;
- Baixa demanda;
- Uso de motores geradores;
- Longe dos grandes centros;
- Difícil acesso;
- Subsidiada pela Conta de Consumo de Combustível;
- 3 milhões de km²;
- Abrange 60% da Amazônia legal.

Esses sistemas são baseados em óleo diesel, que é poluente, são pequenos e têm baixa demanda. Eles são usados em comunidades de baixa renda, que são subsidiadas nas contas de consumo de combustível, chamadas CCC.

No entanto, há uma tendência de redução desse uso, não só pela interligação, mas também porque muitas comunidades na Amazônia têm a linha de alta tensão passando sobre suas habitações. Contudo, não conseguem usar essa energia porque não é viável financeiramente.

É nesse contexto que entram os motores movidos a Hidrogênio Verde, pois podem se apresentar como uma solução mais sustentável e econômica para essas áreas isoladas. Essa tecnologia integra o nosso sistema elétrico e tem o potencial de fornecer energia limpa e acessível a essas comunidades.

A figura a seguir mostra a iluminação dos continentes através da eletricidade. É uma montagem difícil de fazer, já que metade do planeta sempre estará na sombra (noite) em relação à outra metade (dia).

Percebemos a presença de eletricidade em diferentes regiões do mundo, o que indica a oferta de energia, a população envolvida e o consumo energético.

Noite na Terra

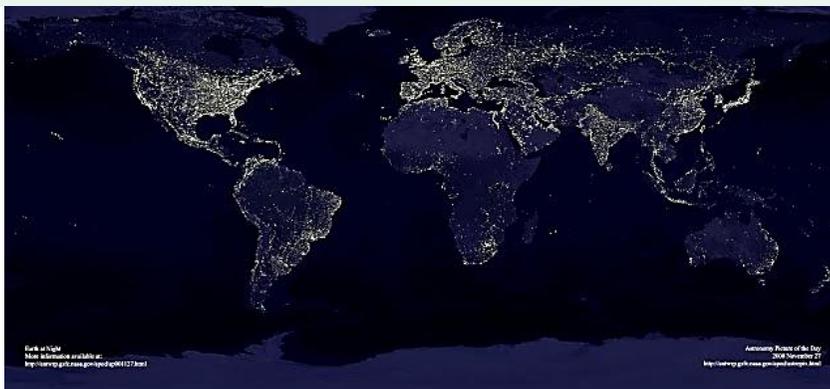


Figura 65: Noite na Terra. Fonte: (NASA, 2022)

A concentração de pessoas e riquezas é maior no hemisfério norte, como podemos ver nos Estados Unidos, que têm muitos habitantes e muita iluminação, enquanto a Índia, apesar de ter uma população maior, tem menos iluminação proporcionalmente.

Também compreendemos a distribuição da eletricidade no mundo e a importância da oferta de energia para o desenvolvimento das comunidades. Essa distribuição populacional e de riqueza também influencia na demanda energética dessas regiões, o que pode ser relevante no contexto do Hidrogênio Verde.

Brasil de Noite



Na imagem ao lado, é possível observar a distribuição populacional no Brasil, concentrada principalmente na costa, além da importância dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, tanto em termos de densidade populacional quanto de riqueza

Figura 66: Fonte: (NASA, 2022)

Ao comparar regiões com diferentes níveis de desenvolvimento, como a Europa e a África, é possível observar a importância da concentração populacional nas áreas costeiras.

Europa de noite



África de noite



Figura 67: Noite Auropa X África. Fonte: (NASA, 2022)

Na África do Sul, por exemplo, há uma grande concentração de pessoas nessa região. Já na África do Norte, no Magrebe, que inclui países como Argélia, Mauritânia, Tunísia e Marrocos, também há uma forte concentração populacional na costa. Esses mapas são extremamente interessantes para análise detalhada.

No contexto do Hidrogênio Verde, a compreensão da distribuição populacional e da concentração de riqueza em diferentes regiões é fundamental para o planejamento e implementação de projetos de produção de hidrogênio renovável, visando atender às demandas energéticas de forma sustentável e equitativa.

5. Organização do Setor Elétrico Brasileiro

Um tema relevante para a compreensão da inserção do Hidrogênio Verde em nossa matriz energética é a organização do setor elétrico brasileiro. É fundamental entender como os empreendimentos são organizados do ponto de vista legal e como o hidrogênio pode ser integrado nesse contexto. Dessa forma, podemos garantir uma transição energética mais eficiente e sustentável.

A produção de Hidrogênio Verde é um assunto importante que tem ganhado destaque na discussão sobre a transição para fontes de energia mais limpas.

É importante entender a organização do setor elétrico no Brasil, como podemos ver na imagem a seguir:

Organização do setor elétrico no Brasil



Figura 68: Fonte: adaptado de capacita CCEE (2018)

No Brasil, a organização das políticas energéticas começa pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), vinculado à Presidência da República e composto por membros de diferentes setores, incluindo Ministérios, sociedade civil e universidades.

Conselho Nacional de Política Energética - CNPE

- Responsável por formular políticas diretrizes para o setor energético;
- Identificar as soluções mais adequadas;
- Diretamente vinculado à Presidência da República;
- Participam: Ministérios, Sociedade civil e Universidades.

O órgão responsável por executar as políticas estabelecidas pelo CNPE é o Ministério de Minas e Energia, que segue as diretrizes do conselho.

Ministério de Minas e Energia – MME

- Formulação e implementação de políticas para o setor energético;
- Seguindo as diretrizes do CNPE.

Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico - CMSE

- Monitora as condições de atendimento;
- Recomenda ações preventivas de segurança do suprimento;
- Vinculado ao MME;
- Conta com representação do todo o setor: ANEEL, ANP, CCEE, EPE, ONS.

Para planejar a expansão do setor de energia, o Ministério conta com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), um órgão consultivo que realiza prospecções, estatísticas e planejamentos para o setor.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE

- Realiza estudos para definir a Matriz Energética;
- Planeja a expansão do Setor Elétrico;
- Geração;
- Transmissão.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regula a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no país.

Desde a quebra do monopólio estatal na década de 1990, o setor elétrico brasileiro é composto por empresas públicas e privadas, sendo que a ANEEL regula a oferta de energia para a sociedade independentemente do tipo de capital envolvido.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL

- Regula e fiscaliza:
- Produção; transmissão; Distribuição
- Objetivo: equilíbrio do mercado; universalização do atendimento; melhores tarifas para o consumidor.

Agentes

- Todas as empresas que atuam no setor
- Categoria Geração: Produtores independentes de energia; Concessionários de serviço público; autoprodutores
- Categoria de Distribuição: Empresas Distribuidoras
- Categoria de Comercialização: Consumidores Livres; Consumidores Especiais; Comercializadores; Importadores e Exportadores; varejista
- Transmissores: São Agentes perante a ANEEL; não comercialização energia.

As empresas do setor podem atuar em até duas das três modalidades: geração, transmissão e distribuição, mas não podem ter monopólio sobre todas elas em uma mesma região. A ANEEL tem um papel fundamental na regulação e fiscalização do setor elétrico e, assim como outras agências reguladoras, é formada por membros da sociedade civil e do poder público.

Operador Nacional do Sistema

- Coordena: Operação do SIN; Controla a Instalações de novas geradoras; Controla A transmissão
- Planeja a operação do SISol
- Fiscalizada pela ANEEL

Figura 69: Fonte: adaptado de Capacita CCEE (2018)

No mercado livre de energia, as empresas atuam como comercializadores, identificando quem tem energia e quem quer comprá-la, e organizando contratos. A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica é responsável por viabilizar os preços e os contratos, e resolver disputas no setor.

Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)

- Viabiliza a comercialização de energia;
- Administra contratos;
- Realiza a liquidação de mercado de curto prazo;
- Realiza os leilões de energia.

Figura 70: Fonte: adaptado de Capacita CCEE (2018)

A produção de Hidrogênio Verde pode ter um papel importante no setor de energia, mas ainda há desafios a serem superados para sua ampla adoção.

Além disso, para empreender no ramo do Hidrogênio Verde, é preciso estar ciente dos diversos órgãos regulatórios envolvidos no processo. Uma alternativa para produzir Hidrogênio Verde é a reforma de biogás, que envolve a quebra de moléculas de metano para obter hidrogênio. No entanto, essa é uma rota mais cara do que a eletrólise.

Portanto, para produzir eletricidade verde e obter Hidrogênio Verde, é necessário entender a estrutura do setor elétrico e as diferentes rotas de produção de hidrogênio.

Resumo da Organização do Setor Elétrico Brasileiro

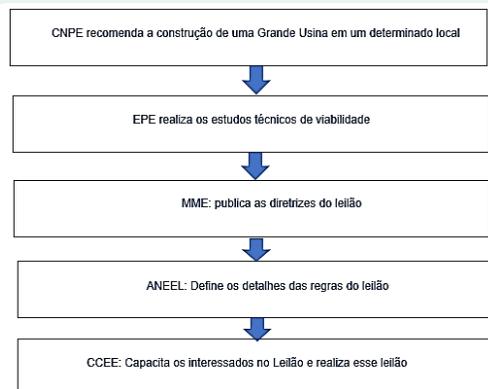


Figura 71: Fonte: adaptado de Capacita CCEE (2018)

Na produção de Hidrogênio Verde, a eletricidade solar e eólica são as fontes verdes mais utilizadas para converter a água em hidrogênio e oxigênio. Por isso, é fundamental compreender como funciona o sistema elétrico para entender como o Hidrogênio Verde entrará nesse contexto.

6. Energia Solar Fotovoltaica

Para compreender melhor a importância do Hidrogênio Verde, podemos observar o crescimento da energia solar fotovoltaica em todo o mundo. Quando mencionamos energia solar, estamos nos referindo à conversão da energia solar em energia elétrica. Essa energia pode ser utilizada para alimentar residências, empresas e até mesmo indústrias.

Ao ler relatórios de energia, é comum encontrar abreviações como GWp, MWp e KWp. O "P" nessas abreviações significa "pico", que se refere à potência de energia produzida pela usina solar fotovoltaica durante o horário de pico, quando a energia solar é mais intensa.

É importante lembrar que, embora o movimento aparente do sol seja responsável pela variação de intensidade da energia solar, na verdade é a Terra que se move em torno do sol.

Entre 2010 e 2020, houve um crescimento anual de 34% na energia solar fotovoltaica, principalmente na Ásia, onde a China liderou as instalações de energia solar fotovoltaica.

Energia Solar Fotovoltaica (MUNDO)

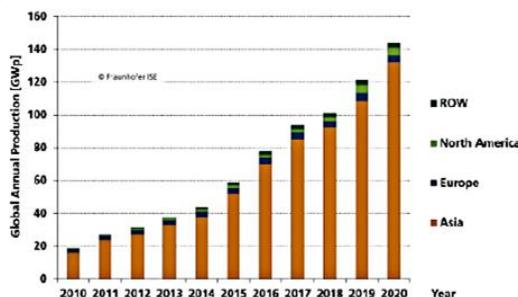


Figura 72: Produção anual de módulo FV por região do mundo.

Fonte: ISE Fraunhofer Photovoltaics Report 2022

De fato, a China produziu 95% dos módulos de silício cristalino, o material mais comumente utilizado na produção de energia solar fotovoltaica.

É importante notar que as informações aqui apresentadas se referem a grandes empreendimentos de energia solar fotovoltaica, como usinas solares, e não à instalação de painéis solares em residências. Para instalar um sistema de energia solar em sua casa, basta contratar uma empresa e conversar com a distribuidora de energia.

Para incentivar a distribuição e transmissão de energia solar, bem como outros empreendimentos sustentáveis, existem incentivos fiscais disponíveis para usinas solares de até 30 M. Além disso, os mercados estão cada vez mais competitivos, o que faz com que subsídios estejam sendo substituídos por preços competitivos.

O tamanho dos módulos solares fotovoltaicos está aumentando, com módulos de 600 W agora disponíveis no mercado. Além disso, os módulos bifaciais permitem que a energia solar seja capturada não apenas diretamente do sol, mas também através do albedo, ou seja, da reflexão do ambiente. Isso ajuda a aumentar a produção de energia solar fotovoltaica.

Em resumo, a energia solar fotovoltaica tem experimentado um crescimento significativo nos últimos anos, e o Hidrogênio Verde é uma tecnologia importante para garantir a sustentabilidade da produção de hidrogênio no futuro.

Reforçando alguns dados:

- A energia fotovoltaica é um mercado em rápido crescimento: a taxa de crescimento anual foi de 34% entre o ano de 2010 a 2020 (On e off grid);
- Em 2020, A Ásia produziu 95% dos módulos de silício (c-Si). A china detém a liderança com uma participação de 67%. A Europa contribuiu com 3%; EUA/CAN com 2%;
- O tamanho dos módulos aumentou e estão com 600 W;
- Atualmente 84% dos módulos é de silício monocristalino;
- O mercado atual substituiu os subsídios por preços competitivos.

Podemos observar na figura a seguir, que alguns países têm se destacado na produção de energia solar fotovoltaica, e como a Alemanha enfrentou desafios técnicos ao priorizar pequenas instalações residenciais.

Energia Solar Fotovoltaica em alguns países

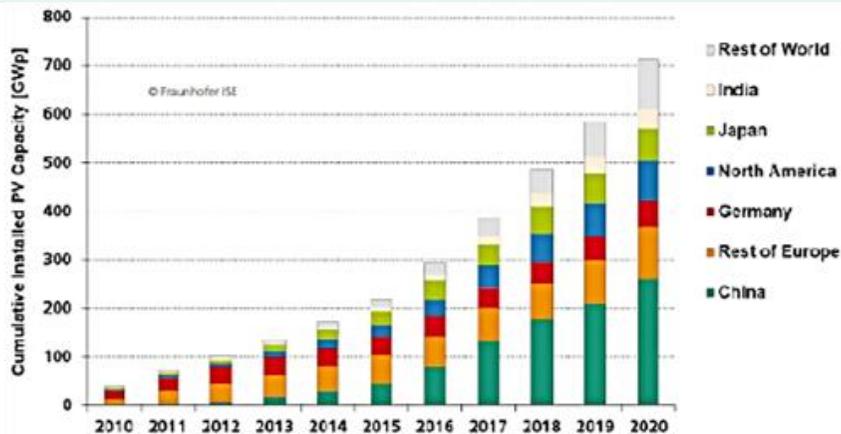
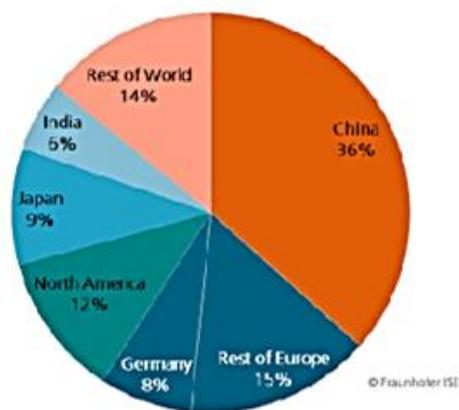


Figura 73: Instalação FV acumulada de 2010 – 2020.
Fonte: ISE Fraunhofer Photovoltaics Report 2022



A partir de 2010 até 2020, o Japão aumentou significativamente sua participação na produção de energia solar fotovoltaica, principalmente após o acidente nuclear que ocorreu no país. A América do Norte também teve um aumento considerável na produção de energia solar nesse período.

A Alemanha, por sua vez, enfrentou problemas técnicos ao priorizar pequenas instalações residenciais. Isso ocorreu porque essas instalações geravam problemas de frequência e harmônicas, o que levou à necessidade de colocação de inversores nos postes. Em 2013, o Brasil instalou a maior usina solar fotovoltaica da época perto de Paulínia em Campinas, a Usina Solar de Tanquinho.

Um ponto importante a ser destacado é que nem sempre é vantajoso ter pequenas instalações solares fotovoltaicas em residências, pois isso pode gerar problemas técnicos. Além disso, sem armazenamento, essas instalações não conseguem fornecer energia elétrica durante períodos de falta de luz solar.

Para garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica, é necessário ter grandes usinas solares fotovoltaicas que possuam armazenamento de energia em baterias. Além disso, uma alternativa utilizada pelo Japão é o armazenamento e uso de células a combustível de hidrogênio, que é produzido a partir de fontes renováveis de energia, como a energia solar e eólica, o que o torna uma forma de Hidrogênio Verde.

Portanto, a produção de energia a partir de fontes renováveis como a energia solar e o Hidrogênio Verde é uma alternativa viável para a transição energética, mas é necessário entender os desafios técnicos envolvidos e investir em soluções adequadas para garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica.

Vamos analisar a evolução de 150 GWp por tecnologia utilizada na produção de energia solar fotovoltaica, como a tecnologia de filme fino, a tecnologia de monocristalino e a tecnologia de policristalino.

A tecnologia de filme fino é interessante porque ela precisa funcionar a temperaturas baixas, devido ao seu SPC (padrão de desempenho). Isso ocorre porque a solar fotovoltaica não funciona bem com o calor, e quando a temperatura aumenta, a tensão diminui, afetando a potência do módulo.

Em locais mais quentes e com menor necessidade de energia, a tecnologia de filme fino pode ser uma boa escolha, já que ela é menos suscetível às variações de temperatura. No entanto, ela é menos eficiente que as outras tecnologias.

Produção anual por tecnologia (filme fino, monocristalino e policristalino)

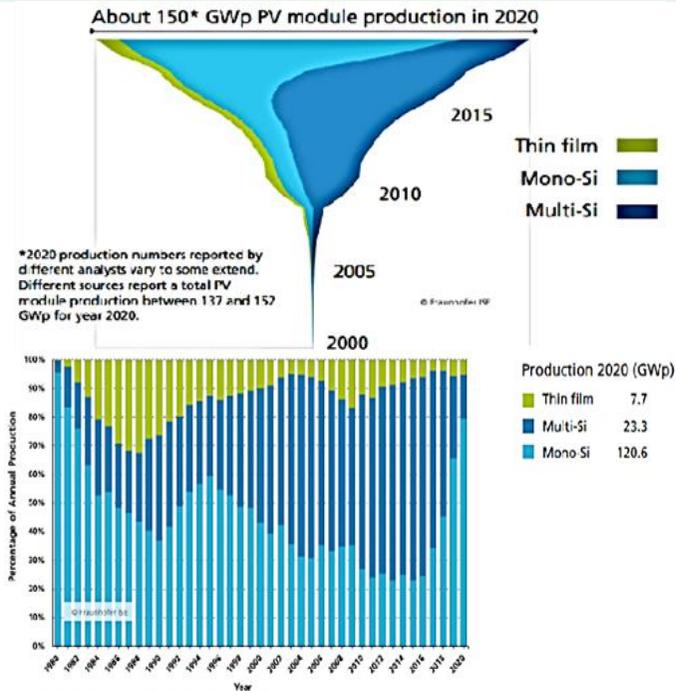


Figura 74: Fonte: ISE Fraunhofer Photovoltaics Report 2022

A tecnologia de monocristalino é mais eficiente que a tecnologia de policristalino, e por isso está ganhando mais espaço no mercado. Apesar de ser um pouco mais caro que o policristalino, seu desempenho justifica o investimento.

É importante destacar que todos os módulos solares precisam ser limpos regularmente para manter a eficiência. Além disso, para a produção de Hidrogênio Verde, é possível utilizar células a combustível de hidrogênio, como é feito no Japão, em vez de utilizar o hidrogênio proveniente de gás natural.

A energia solar fotovoltaica é uma das tecnologias mais promissoras para a geração de energia limpa e renovável. No Brasil, ela é regulamentada pela resolução 482, que em 2015 foi atualizada para a resolução 687. **(Brasil – Resolução 482/ANEEL – 2012 (687/2015):**

- **Marco para a geração distribuída no Brasil;**
- **Novo paradigma: o consumidor pode se tornar um gerador de energia;**
- **Micro e minigeração distribuída;**
- **Resolução ANEEL 687/2015;**
- **Microgeração FV: P < 100 kW;**
- **Minigeração FV: 100 kWp < P < 1.000 kWp.**

Atualmente, o consumidor pode se tornar um "prossumidor", produzindo e consumindo energia elétrica. Existem duas categorias de produção: microgeração (menos de 100 kWp) e minigeração (de 100 kWp a 1.000 kWp).

No país, existem cerca de 13.334 unidades fotovoltaicas, o que corresponde a quase 6,0 GWp e faz dela a terceira fonte de energia mais importante no Brasil. A energia solar fotovoltaica tem um grande potencial para regiões como o Nordeste e Mato Grosso, onde a incidência solar é alta.

Além disso, existe a resolução 682, que versa sobre a transmissão e a distribuição dos 30 M de energia elétrica gerados por essa tecnologia.

É importante lembrar que, embora a produção de energia elétrica utilizando energia solar fotovoltaica seja uma ótima opção para o meio ambiente e para o bolso, a venda de energia elétrica produzida em residências ainda não é permitida no Brasil, sendo possível apenas a utilização do sistema interligado nacional como bateria.



Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

- **13.334 unidades FV;**
- **~ 6,0 GWp**
- **3ª fonte mais importante**

Figura 75: Fonte: SIGA ANEEL, 2022

No que diz respeito à produção de energia solar fotovoltaica, é interessante analisar o mapa solarimétrico de cada país. Comparando o

mapa da Alemanha com o do Brasil, podemos ver uma grande diferença na capacidade de produção de energia solar.

Energia Solar Fotovoltaica: Brasil X Alemanha

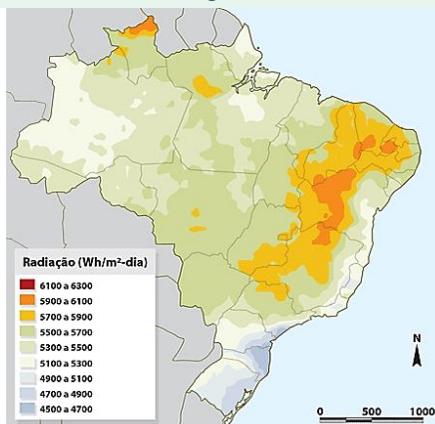


Figura 76: Brasil: Mapa solarimétrico. Fonte: CRESESB

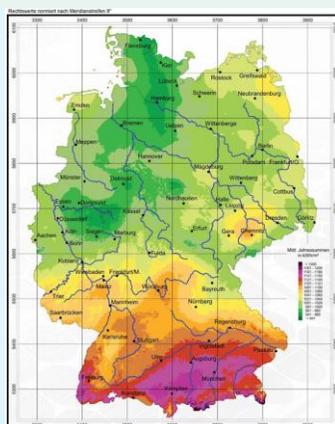


Figura 77: Alemanha. Fonte: Geomodel Solar Irradiação: 900 a 1.200 kWh/m²

Na Alemanha, a máxima potência alcança 1.200 kWp/h por metro quadrado, enquanto no Brasil, mesmo em regiões com menor potencial, como a de 5.1 kWp/h por dia, ainda temos uma capacidade muito maior.

Apesar de possuímos um grande potencial, a energia solar fotovoltaica ainda é vista como um complemento ao nosso sistema energético, uma vez que temos outras fontes de energia mais baratas.

Enquanto isso, na Alemanha, essa forma de energia se desenvolveu muito e é bastante utilizada. É importante ressaltar que mesmo com uma menor irradiação solar do que a Alemanha, o Brasil tem uma maior capacidade de produção de energia solar devido à sua grande extensão territorial e diferentes regiões com alto potencial solar.

Vamos falar sobre a relação entre as estações do ano, a angulação do eixo da Terra e a produção de energia fotovoltaica e Hidrogênio Verde. É comum acreditar que as estações do ano estão relacionadas com a distância da Terra em relação ao Sol, mas na verdade elas estão relacionadas com a angulação do eixo da Terra. Essa angulação é de

23,45° e ao longo de um período de 365 dias, ela é responsável pelas diferenças de estações no planeta.

Quando vamos calcular o potencial de energia solar fotovoltaica e Hidrogênio Verde por ano, é importante levar em conta as angulações e a proximidade da linha do Equador. No Brasil, no sul do país, o período do ano com maior angulação relativa ao Sol é o inverno. Isso tem impacto na produção de energia solar fotovoltaica, como no caso de um investidor em Minas Gerais, que tinha uma fazenda de 4.000 hectares, mas só conseguia utilizar de forma eficiente 40 hectares por conta do sombreamento das montanhas.

Ao fazer as simulações, o dia 21 de junho, início do inverno, foi escolhido, pois é quando a Terra está em sua máxima angulação em relação ao Sol, resultando em mais sombra e menor produção de energia solar fotovoltaica naquele território. É importante considerar esses fatores para maximizar a produção de energia solar fotovoltaica e Hidrogênio Verde.

Energia Solar Fotovoltaica: recurso local

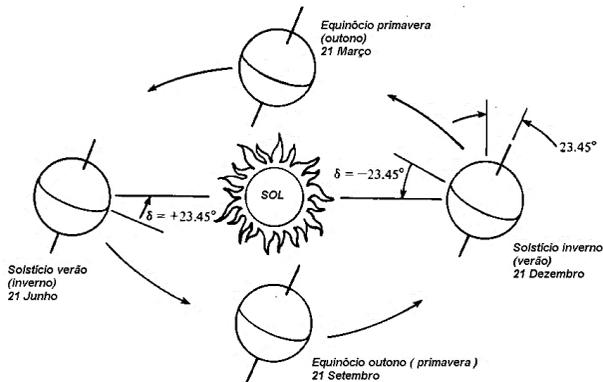


Figura 78: Movimento da Terra ao redor do Sol. Fonte: SILVA, 2014

O equinócio acontece quando o sol tem uma angulação de 90° simétricos. Vamos entender um pouco sobre as angulações da Terra em relação ao Sol. Aqui está a linha do Equador, que divide o planeta em hemisfério norte e sul. Quando o sol bate na parte de cima da Terra, estamos na estação do verão.

Já na parte de baixo, estamos na estação do inverno. Essa diferença não se deve à distância da Terra em relação ao Sol, mas sim à inclinação do eixo da Terra em relação ao Sol. Essa inclinação é de 23,45° graus e ao longo de um período de 365 dias, é responsável pelas diferenças de estações do ano no planeta. Isso é importante para quem trabalha com energia solar fotovoltaica e simulações.

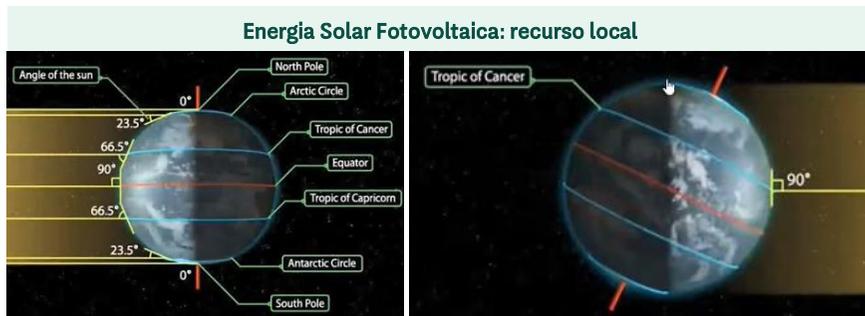


Figura 79: Fonte: ONUDI 2012

Para fazer simulações no PVsyst, por exemplo, é necessário entender esses conceitos básicos sobre o sol e as angulações da Terra.

É importante levar em conta a posição geográfica da cidade em relação à linha do Equador para calcular o potencial de energia solar fotovoltaica e Hidrogênio Verde disponível.

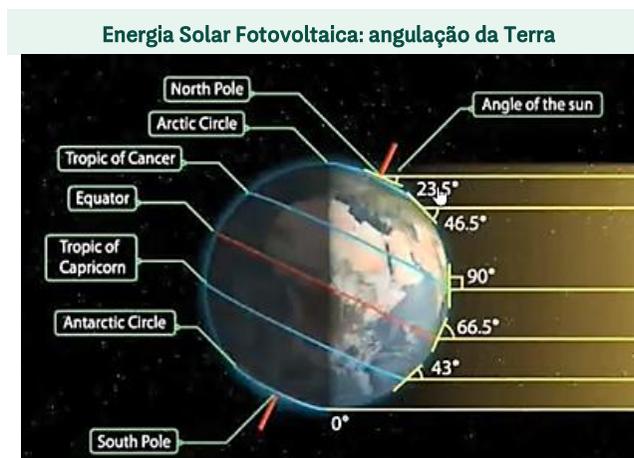


Figura 80: Fonte: ONUDI 2012

A angulação da Terra em relação ao sol é de $23,5^\circ$ e é essa inclinação que faz com que tenhamos as quatro estações do ano: primavera, verão, outono e inverno. Quando uma região está mais inclinada em direção ao sol, é verão. Já quando está inclinada para longe, é inverno.

A quantidade de calor que uma região recebe está relacionada com a quantidade de irradiância solar que ela recebe. Quando uma região recebe mais radiação solar, ela tende a ser mais quente e, quando recebe menos, tende a ser mais fria. Por isso, é importante entender a angulação da Terra em relação ao sol para trabalhar com energia solar fotovoltaica e simulações.

Assim, é possível escolher a melhor localização para instalar os painéis solares e garantir maior eficiência na produção de energia solar. Além disso, a energia solar pode ser utilizada na produção de Hidrogênio Verde, que é uma fonte de energia limpa e renovável.

No topo da atmosfera terrestre, há uma constante solar que representa a quantidade de energia solar que chega até lá sem sofrer perdas. No entanto, quando essa radiação solar atravessa a atmosfera, parte dela é absorvida e refletida de volta para o espaço. Esse fenômeno é conhecido como perda de gases de efeito estufa natural da Terra.

Apesar de ser prejudicial para o meio ambiente quando causado por atividades humanas, o efeito estufa natural é importante para a vida no planeta. Isso ocorre porque ele é responsável por manter a temperatura média da Terra em um nível ideal para a sobrevivência de seres vivos.

Energia Solar Fotovoltaica: angulação da Terra

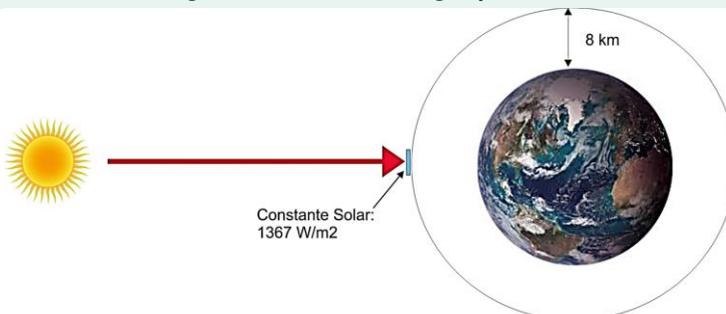


Figura 81: Fonte: ONUDI 2012

A constante solar no topo da atmosfera é de 1.367 W/m^2 SPC, enquanto na superfície terrestre essa quantidade é de cerca de 1.000 W/m^2 . Quando se faz a simulação de energia solar fotovoltaica utilizando o software PVSyst, utiliza-se a quantidade de 1.000 W/m^2 . A radiação solar é responsável por grande parte da energia na Terra, mas nem toda ela chega à superfície. Na verdade, cerca de 19% da radiação solar é absorvida pela atmosfera e pelas nuvens.

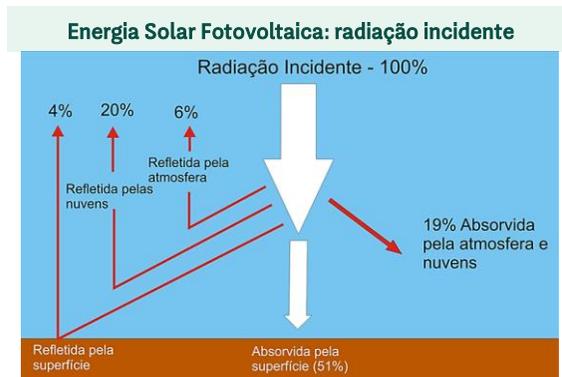


Figura 82: Fonte: ONUDI, 2012

Esse processo resulta no efeito estufa natural da Terra, que é essencial para a vida no planeta. O principal gás do efeito estufa é a água, que é responsável por manter a temperatura média da Terra em torno de 15°C a 16°C . Sem o efeito estufa, a temperatura seria de -30°C , o que inviabilizaria a existência de vida como a conhecemos.

Além da radiação absorvida, ocorre também a radiação refletida. Cerca de 4% da radiação solar é refletida pela superfície terrestre, fenômeno conhecido como albedo. Esse valor é utilizado em simulações de energia solar fotovoltaica.

Outros 20% da radiação é refletida pelas nuvens. Isso significa que em dias nublados, a radiação direta é reduzida e a difusa é predominante. A radiação direta bate na superfície com um ângulo de 90° , enquanto a difusa chega de forma indireta.

É importante lembrar que mesmo em dias nublados, é necessário usar protetor solar, pois ainda há irradiação difusa que pode causar queimaduras.

A seguir, são apresentados os ângulos do Sol em relação à superfície da Terra, com a angulação de 190 graus. O que vai depender é a angulação da Terra em relação ao Sol.

Radiação incidente na superfície da Terra

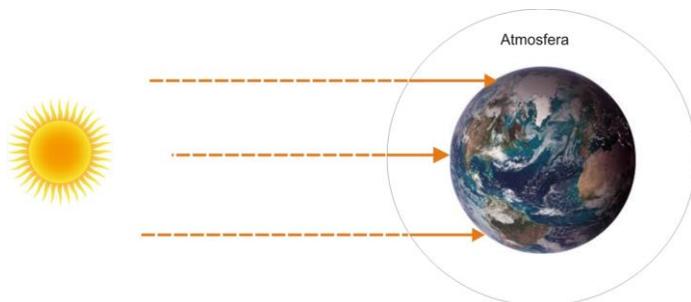


Figura 83: Fonte: ONUDI 2012

Podemos visualizar a seguir um mapa mundial que mostra a irradiação solar na superfície terrestre no plano horizontal.

Ressaltamos que os módulos solares fotovoltaicos precisam ser instalados de acordo com a latitude da região, já que a Terra possui uma inclinação de 23 graus em relação ao Sol.

Irradiação solar na superfície terrestre no plano horizontal

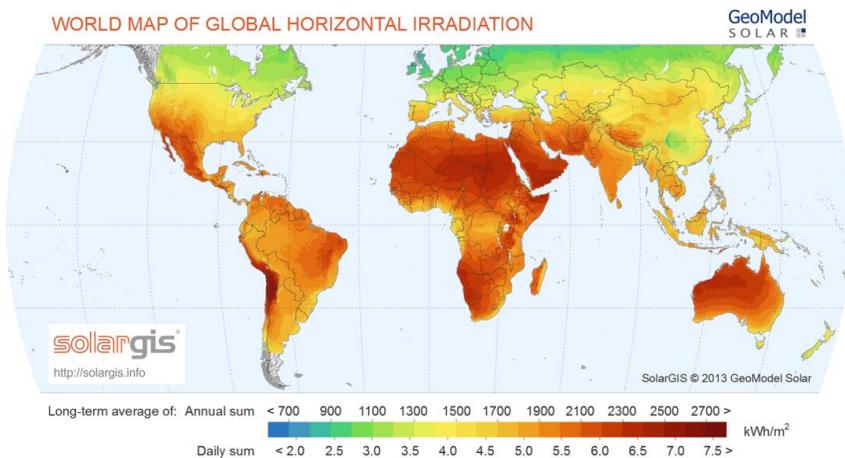


Figura 84: Fonte: SILVA, 2014

Se você está em uma região mais próxima do equador, como no Nordeste do Brasil, a instalação dos painéis solares no plano horizontal seria mais eficiente, já que a irradiação solar é mais intensa.

No entanto, isso não é recomendado devido à presença de poeira e outros fatores que podem prejudicar o desempenho dos painéis solares. Em geral, a angulação máxima das estruturas de painéis solares fotovoltaicos deve ser em torno de 10 graus no Nordeste do Brasil.

Quanto mais longe da linha do equador, maior deve ser a angulação dos painéis para que possam aproveitar ao máximo a energia solar disponível. É importante lembrar que o aproveitamento solar é possível em todo o planeta, exceto nos polos, onde há seis meses de sombra e seis meses de sol.

O gráfico a seguir é útil para entendermos as características da energia solar, que é aleatória e variável. Visualizamos a produção de uma planta solar fotovoltaica localizada em Campinas. A linha azul representa a radiação global, que engloba a radiação direta, a difusa e a refletida. A linha vermelha corresponde à radiação difusa, responsável pela produção de energia elétrica. A linha verde representa a radiação direta.

Irradiação solar na superfície terrestre no plano horizontal

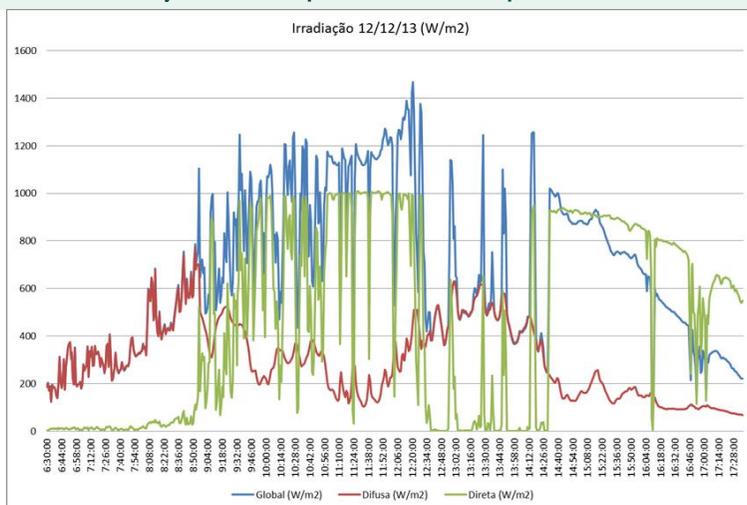


Figura 85: Fonte: SILVA, 2014

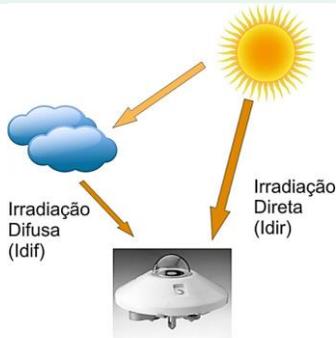
Os picos de produção de energia solar fotovoltaica ocorrem entre 8h e 9h, e o pico máximo é registrado em torno das 10h. A produção de energia solar diminui gradualmente até o final do dia, por volta das 18h. Apesar de a produção ser aleatória, é mais ou menos assim que funciona o pico de energia solar.

É importante lembrar que a produção de energia solar é variável e não pode ser totalmente controlada. A quantidade de energia gerada depende das condições climáticas e de outras variáveis.

Quando falamos sobre energia solar, estamos sempre nos referindo a unidades de medida como W, kW, GB ou TW. Estas unidades representam a quantidade de energia gerada em um determinado momento e são importantes para entendermos a capacidade de produção de energia solar.

A radiação solar tem diferentes componentes (figura a seguir), incluindo a radiação global no plano horizontal, a radiação difusa que vem de nuvens e a constante solar que é de 1367 W.

Componentes da irradiação



Global = Direta + Difusa

Figura 86: Fonte: Notas de aula, 2023.

É importante entender essas componentes, pois elas influenciam diretamente na produção de Hidrogênio Verde.

Quando realizamos o cálculo da radiação global, levamos em consideração a radiação direta, a difusa e o albedo.

É necessário conhecer esses conceitos para entender a quantidade de energia solar disponível em uma determinada região e como aproveitá-la para produzir hidrogênio. Embora haja fórmulas matemáticas complexas para realizar esses cálculos, neste livro, o objetivo é

apresentar uma visão geral das componentes da radiação solar, sem entrar em detalhes matemáticos complicados.

Resumos das Componentes da irradiação

- **Irradiação Global Horizontal (IGH)** – A IGH inclui a irradiação recebida diretamente e a irradiação recebida de todas as direções devido à dispersão na atmosfera (irradiação difusa e albedo);
- **Irradiação Normal Direta** – É a irradiação solar total recebida em uma superfície que está diretamente faceando o Sol durante todo o tempo. A irradiação direta é de interesse particular para instalações que utilizam estruturas móveis (sistemas com concentradores – CSP);
- **Irradiação Difusa** – É a irradiação recebida em uma unidade de área de superfície horizontal de todas as direções quando a irradiação é dispersa na atmosfera e das áreas adjacentes;
- **Albedo** – Parte da radiação solar que chega à superfície da Terra e é refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos etc.);
- **Constante solar (I_0)** – Irradiação no topo da atmosfera 1.367 W/m^2 .

Na figura a seguir, é apresentado um instrumento muito importante para a medição da irradiação solar, chamado piranômetro sombreado.

Irradiação: instrumentos de medição



Figura 87: Exemplo de Estação Solarimétrica – Usina Solar Tanquinho. Fonte: elaboração própria

Essa estrutura serve para sombrear o piranômetro, que é responsável por captar a irradiação difusa, ou seja, aquela que vem das nuvens de forma indireta e não em um ângulo de 90 graus.

Além disso, o piranômetro também capta a irradiação global, que é composta pela difusa, direta e o albedo, visto no plano horizontal.

Outro instrumento utilizado para medir a radiação solar é o pireliômetro, responsável por medir a radiação direta. Ele fica posicionado diretamente com a angulação para o sol. Tanto o piranômetro quanto o

pireliômetro são acoplados em um rastreador solar, que não funciona como um girassol, mas sim em graus por minuto.

O rastreador solar é programado para mudar de posição de acordo com o movimento aparente do sol em determinado tempo. Esses instrumentos são fundamentais para medir a irradiação solar e assim poder produzir Hidrogênio Verde de forma eficiente.

A seguir, apresentamos dados de um simulador para visualizar a radiação solar diretamente em base mensal. Essas informações podem ser encontradas no CRESESB, onde é possível ver a radiação diária mensal em diferentes estados, como Bahia, Ceará e Pernambuco.

No CRESESB, você também pode fazer simulações de ventos. No entanto, a ferramenta está um pouco desatualizada e é muito antiga. Este site é da USP, mas ainda é útil para obter uma média geral.

Exemplo de cálculo online de energia																
Município: Campinas - SP																
Latitude: 22,905555° Sul																
Longitude: 47,060833° Oeste																
Distância: 48,9 km																
#	Ângulo	Inclinação	Radiação diária média mensal [kwh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,33	5,56	5,22	4,53	4,06	3,56	4,19	4,58	4,75	5,58	5,86	5,53	4,90	2,30
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	22° N	4,86	5,32	5,37	5,12	5,03	4,59	5,39	5,41	5,05	5,46	5,38	4,97	5,16	,87
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	22° N	4,86	5,32	5,37	5,12	5,03	4,59	5,39	5,41	5,05	5,46	5,38	4,97	5,16	,87
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	26° N	4,72	5,22	5,34	5,16	5,15	4,73	5,55	5,49	5,05	5,37	5,24	4,82	5,15	,82

Marque as caixas de seleção para atualizar a visualização das curvas de radiação no gráfico.

Figura 88: Dados locais irradiação – site cresesb. Fonte: CRESESB

No entanto, não é recomendado utilizá-lo para fazer simulações precisas. Essas informações são importantes para entendermos como a radiação solar pode afetar a produção de Hidrogênio Verde.

Vamos falar um pouco sobre o silício, que é um material semicondutor utilizado nos módulos solares fotovoltaicos. O topo da camada de valência do silício tem 3 elétrons, ou seja, precisa de mais uma ligação para se estabilizar.

Quando a luz solar incide sobre o material semicondutor, a energia é absorvida e utilizada para movimentar os elétrons através das camadas do material. Isso ocorre porque é necessário dopar o silício para que ele possa receber elétrons. É possível utilizar outros materiais, como boro

e fósforo, que são doadores e receptores de elétrons, respectivamente, para criar uma região P e outra N no silício.

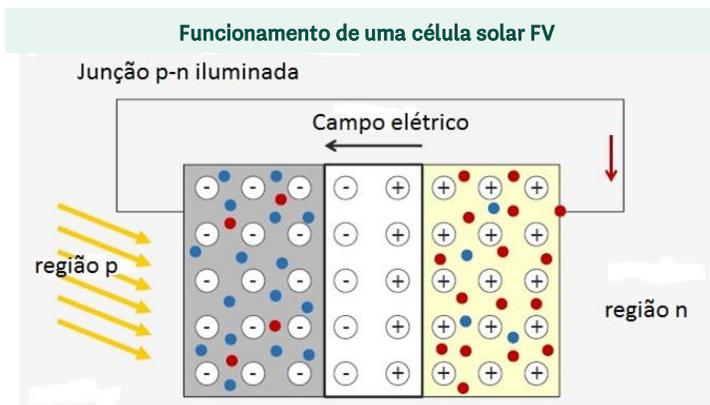


Figura 89: Fonte: Notas de aula, 2023.

Essa diferença de potencial gerada entre as camadas P e N do material cria um campo elétrico que induz o movimento dos elétrons, gerando energia elétrica. É importante destacar que, se as células solares fotovoltaicas não estiverem conectadas corretamente, o material semicondutor ficará livre e produzirá mais calor do que eletricidade.

Por isso, o uso do silício é de extrema importância, pois ele tem a capacidade de perder e receber elétrons, permitindo a geração de energia elétrica. O efeito fotovoltaico, descoberto por Albert Einstein, é a base da tecnologia de painéis solares fotovoltaicos, os quais convertem a luz solar em eletricidade.

No contexto da produção de energia a partir de fontes renováveis, como o Hidrogênio Verde, é importante entender como funcionam os materiais solares fotovoltaicos. Eles são compostos por células que, por sua vez, podem ser combinadas em módulos solares, formando os chamados painéis solares.

As células FV são conectadas eletricamente em circuito série e/ou paralelo para produzir níveis de tensão, correntes e potências maiores.

Os módulos consistem em circuitos de células FV seladas em um encapsulamento protegido das condições ambientais.

Irradiação: instrumentos de medição

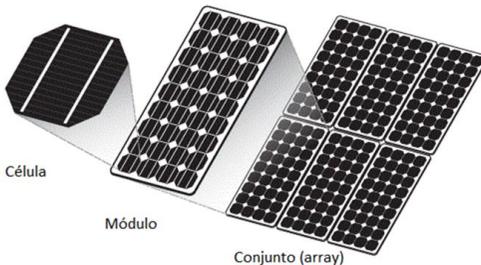


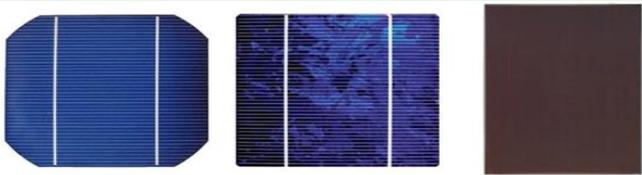
Figura 90: Fonte: Notas de aula, 2023.

Cada célula solar é composta por uma estrutura que permite a condução de elétrons, que é o que gera a energia elétrica. Essas células podem ser conectadas eletricamente em circuitos série e/ou paralelo, formando os módulos solares que compõem os painéis solares.

Os painéis solares são selados e encapsulados para proteger as células solares do ambiente externo e aumentar sua durabilidade. Quando expostos à luz solar, esses materiais geram uma corrente elétrica que pode ser utilizada para produzir Hidrogênio Verde ou alimentar sistemas elétricos.

As principais células solares fotovoltaicas são as monocristalino, policristalino e filme fino.

Principais células de FV e comparativo de Eficiência e Custo médio



	Monocristalino	Policristalino	Filme Fino
Comparativo	Policristalino (%)	Monocristalino (%)	Filme Fino (%)
Eficiência comercial (%)	14 – 18	16 – 21	6 – 14
Custo (US\$/Wp)	1,06	1,1	0,84

Figura 91: Fonte: Notas de aula, 2023.

Podemos observar o efeito da temperatura na célula fotovoltaica. É importante ressaltar que a temperatura e a tensão possuem uma relação direta. Para exemplificar essa relação, consideremos um painel

fotovoltaico com potência máxima de 1.000W e corrente máxima de 1,5A.

A irradiância por m^2 (AM) influencia diretamente na produção de energia elétrica. Porém, a temperatura também influencia na produção, visto que um aumento na temperatura da célula fotovoltaica pode causar uma diminuição na tensão dela.

Na figura a seguir, vemos que para uma temperatura de $30^{\circ}C$ a tensão é de 25V. Conforme a temperatura aumenta, a tensão diminui, chegando a 16V a uma temperatura de $50^{\circ}C$. É importante lembrar que a potência é igual ao produto da tensão pela corrente, ou seja, a potência também será afetada pela temperatura.

Efeito causado pela temperatura na célula: temperatura x tensão

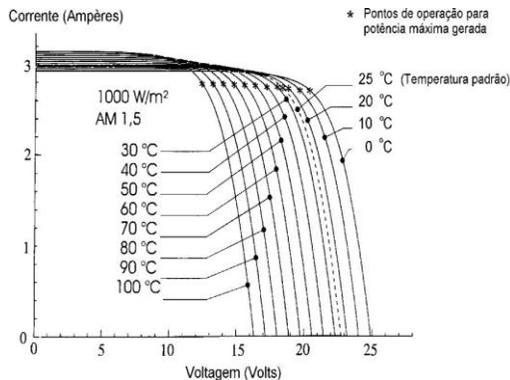


Figura 92: Fonte: Notas de aula, 2023.

Vale ressaltar que a eficiência da célula fotovoltaica é melhor em regiões mais frias, como o Alasca, e não devido à angulação da Terra. Isso ocorre porque temperaturas mais baixas reduzem os efeitos negativos da temperatura na produção de energia elétrica.

Agora, vamos discutir o funcionamento do sistema de rastreamento fixo e móvel utilizado em Campinas.

Na figura a seguir, a linha vermelha representa a produção de energia elétrica do rastreador em comparação ao sistema fixo. O rastreamento solar (estrutura móvel) apresenta a vantagem de gerar maior produção de energia elétrica em locais com boa irradiação direta.

Estrutura dos módulos FV: fixa X móvel

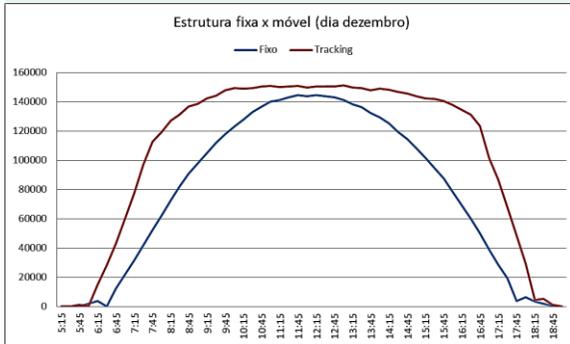


Figura 93: Fonte: ONUDI 2014

Recurso solar local

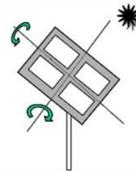
- Estruturas móvel (tracking)
- Vantagem: maior produção em locais com boa irradiação direta.
- Desvantagens: custo maior, consumo de energia, área ocupada maior, O&M maior

No entanto, é importante lembrar que essa opção móvel também apresenta uma desvantagem, pois o custo e o consumo de energia são maiores, além de ocupar uma área maior.

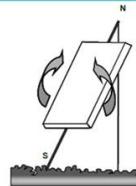
O rastreamento (estrutura móvel ou tracking) não segue o sol em tempo real, mas é programado para mudar de posição em determinados intervalos de tempo.

Resumo da estrutura dos módulos FV

Rastreamento em dois eixos. A superfície coletora mantém a todo momento perpendicular aos raios de sol, de modo a assegurar a máxima captação de energia. Para que o ângulo de incidência seja mínimo, a inclinação da superfície deveria ser igual ao ângulo zenital do sol e a orientação igual ao azimute solar.



Rastreamento em um eixo polar (inclinado a latitude de lugar). Gira sobre um eixo norte-sul com a superfície orientada ao sul para o hemisfério norte e ao norte para o hemisfério sul, e inclinado um ângulo igual à latitude, de forma que o eixo de rotação do sistema é paralelo ao eixo da terra. A rotação se ajusta para que a normal à superfície coincida a todo momento com o meridiano local que contém o sol e a velocidade de rotação é de 15° por hora.



Rastreamento em um eixo azimutal. A superfície gira sobre um eixo vertical. O ângulo de inclinação da superfície é constante e igual à latitude. O giro se ajusta para que a normal à superfície coincida a todo momento com o meridiano local que contém o sol. A velocidade de giro é variável ao longo do dia.



Rastreamento em um eixo horizontal. A superfície gira sobre um eixo horizontal e orientado em direção norte-sul. O giro se ajusta para que a normal à superfície coincida a todo momento com o meridiano terrestre que contém o sol.



Figura 94: Fonte: ONUDI 2014

É importante ressaltar que temos os módulos solares que geram corrente contínua (CC), mas os nossos aparelhos eletrônicos utilizam corrente alternada (CA). Por isso, usamos inversores para transformar a CC em CA. Entretanto, essa transformação gera perda de energia e, por isso, pesquisadores têm trabalhado em alternativas como os eletrolisadores de corrente contínua. Assim, poderemos produzir Hidrogênio Verde a partir da eletrólise da água utilizando corrente contínua e evitar as perdas com inversores.

Diagrama Unifilar: típico de FV

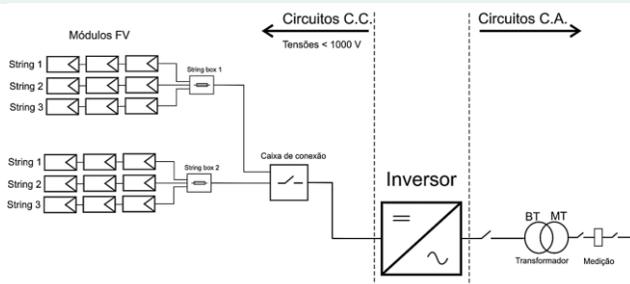


Figura 95: Fonte: Notas de aula, 2023.

No caso brasileiro, como os sistemas elétricos são todos interligados, é possível adquirir energia solar fotovoltaica da Bahia e ter um centro de produção de hidrogênio no Rio Grande do Sul.

Em relação à operação e manutenção do sistema, é importante lembrar da necessidade de limpeza dos módulos solares. Em resumo, ressaltamos informações importantes para garantir a eficiência da tecnologia:

Manutenção programada:

- Limpeza dos módulos.
- Verificação da integridade das conexões entre módulos.
- Verificação das caixas de strings.

- Inspeção termográfica (pontos quentes em módulos e conexões).
- Serviços nos inversores.
- Inspeção da integridade mecânica das estruturas.
- Controle da vegetação.

Manutenção não programada:

- Aperto de parafusos soltos.
- Substituição de fusíveis queimados.
- Substituição de protetores de surto (descargas atmosféricas).
- Substituição de módulos danificados.
- Reparos no sistema de aquisição de dados (SCADA, loggers etc.)
- Conserto de estruturas danificadas.

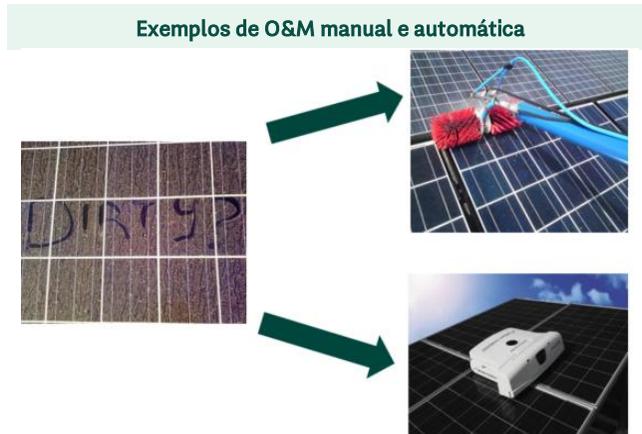


Figura 96: Fonte: Notas de aula, 2023.

7. Energia Solar Fotovoltaica

Vamos abordar agora o uso da energia eólica.

Em 2022, a potência instalada em GW na China, Estados Unidos, Alemanha, Espanha e no Brasil foi de 281 GW. O Brasil está entre os principais países na geração de energia eólica e tem um grande potencial offshore de 197 GW, o que é subdimensionado.

Energia eólica: Mundo x Brasil (Potência instalada em GW)

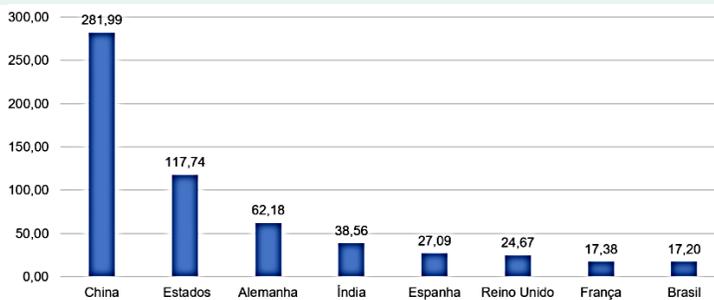


Figura 97: Potência instalada em GW. Fonte: GWEC 2022.

Ao criar o mapa eólico brasileiro, previmos torres eólicas de até 50 metros, mas já existem torres de 100 metros, que geram mais energia elétrica, pois quanto mais longe do solo, menor é a taxa de atrito.

Apresentamos a seguir, as projeções para alcançar o Net-zero e o aumento necessário das novas energias.

A capacidade anual em azul representa o que é necessário para atingir o Net-zero com a estrutura de energia eólica global. O gap em cinza representa a diferença entre a capacidade atual e a necessária.

Então, temos falhado no aumento de GW por ano, e cada unidade que não é alcançada contribui para um déficit final de quase 3.000 TW de energia eólica que precisamos alcançar até 2030.

Projeções de crescimento para atingir o Net-zero

Lagging growth in this decade leads to wind energy shortfalls by 2030

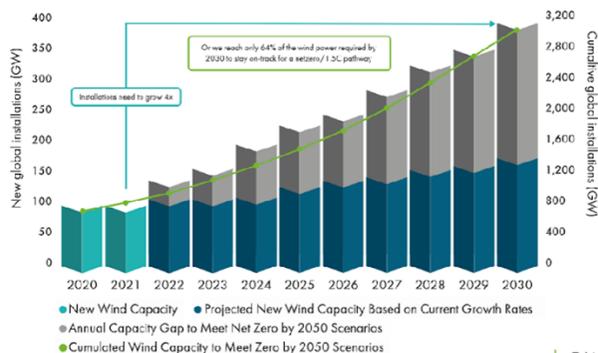


Figura 98: Fonte: GWEC 2020

A indústria eólica global teve seu segundo melhor ano em 2021, com quase 94 GW de capacidade adicionada globalmente. Em 2021, foram comissionados 21,1 GW de capacidade eólica offshore, três vezes mais do que em 2020, tornando 2021 o melhor ano da eólica offshore.

A China representou 80% da capacidade eólica offshore adicionada em todo o mundo em 2021, elevando suas instalações eólicas offshore acumuladas para 27,7 GW.

A capacidade total global de energia eólica agora é de até 837 GW. Espera-se que 557 GW de nova capacidade sejam adicionados nos próximos cinco anos sob as políticas atuais. São mais de 110 GW de novas instalações a cada ano até 2020.

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (ventos) que pode ser aproveitada pela conversão em energia cinética de rotação com o uso de aerogeradores (cata-ventos).

Os ventos são produzidos principalmente por diferenças de pressão na atmosfera, originadas pelo aquecimento diferenciado de massas de ar pela ação do Sol e pelo movimento de rotação da Terra, que provoca um deslocamento relativo entre a superfície do planeta e sua atmosfera.

A seguir, discutiremos a energia eólica e sua relação com a potência gerada pelo vento.

Potência efetiva para aerogeradores (D) diâmetro

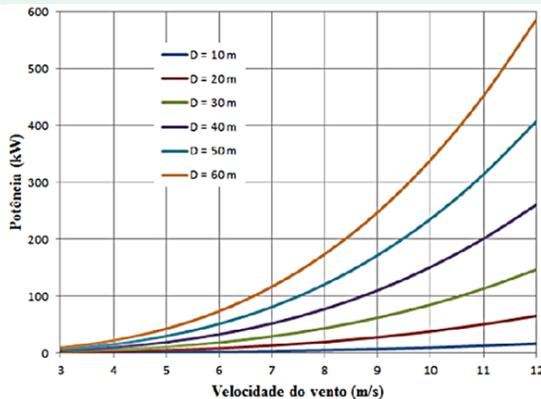


Figura 99: Fonte: Silva, 2014.

Quanto maior a energia do vento, maior é o potencial de recepção pelas pás eólicas. Além disso, o ângulo de ataque também é um fator importante para a geração de energia cinética na rotação dos aerogeradores. Esses são componentes cruciais a serem avaliados na implementação de projetos de energia eólica.

A energia eólica offshore é uma opção cada vez mais interessante para a produção de energia elétrica. Isso se deve, em parte, ao fato de que a velocidade do vento é maior em altitudes mais elevadas e mais distantes de possíveis obstáculos, como árvores e prédios.

Perfis da velocidade dos ventos tomando-se por base o solo

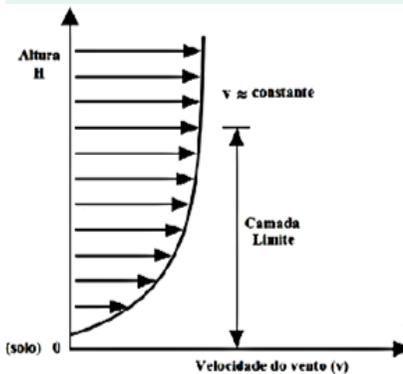


Figura 100: Fonte: *Silva, 2014*.

- Influência da rugosidade do solo na velocidade do vento: quanto maior o valor da rugosidade, menor a velocidade do vento, impactando na curva de potência do aerogerador;

- Valores característicos para a rugosidade do solo brasileiro:

- Mar aberto calmo: 0,0002 m/s
- Mar agitado: 0,0005 m/s
- Planície gramada lisa: 0,01 m/s
- Terreno cultivado, poucas árvores e edificações: 0,03 m/s
- Pequenas cidades, florestas: 0,7 m/s

Além disso, o coeficiente de atrito do mar aberto é muito menor do que em áreas urbanas, o que tem um grande impacto na velocidade do vento capturado pelas pás dos aerogeradores.

Enquanto o coeficiente de atrito em pequenas cidades é de cerca de 0,7m, o coeficiente de atrito do mar aberto é de apenas 0,0002 m, o que torna a energia eólica offshore uma alternativa mais eficiente e promissora para a produção de energia elétrica.

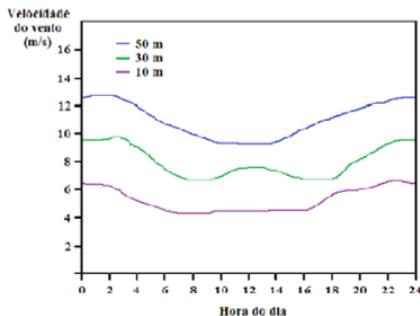
A energia eólica é gerada a partir da variação dos ventos, que ocorrem constantemente na atmosfera. Para medir a velocidade do vento,

utiliza-se um instrumento chamado anemômetro. O potencial eólico é determinado a partir das distribuições estatísticas das velocidades instantâneas dos ventos.

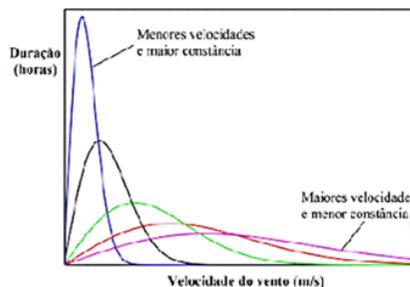
Existem áreas com ventos de menor velocidade, porém mais constantes, e áreas com ventos de maior velocidade, porém menos constantes. Para mapear a disponibilidade de ventos em diferentes regiões do mundo, é necessário fazer médias e mapas eólicos.

A seguir, apresentaremos gráficos das curvas típicas da variação dos ventos. A variação da velocidade do vento ocorre permanentemente (A), e o instrumento que mede as velocidades dos ventos é o anemômetro.

A) Curvas típicas da variação da velocidade do vento ao longo do dia e em relação à altura



B) Curvas típicas da frequência dos ventos



- A variação da velocidade do vento ocorre permanentemente (A)
- instrumento que mede as velocidades dos ventos é o anemômetro
- O potencial eólico se dá pela distribuições estatísticas das velocidades instantâneas: curvas de frequência (B)

Figura 101: Fonte: Silva, 2014.

O potencial eólico se dá pela distribuição estatística das velocidades instantâneas: curvas de frequência (B).

A escala de Beaufort é uma medida empírica que relaciona a velocidade do vento com as condições observadas no mar ou em terra. É uma escala de força do vento variando de 0 (calma) a 12 (furacão), correspondendo à velocidade do vento a uma distância definida acima do nível do solo ou do mar.

Estimativa da velocidade dos ventos (Escala Beaufort)

Grau	Classificação	Efeitos do vento na natureza	Velocidade (m/s)
0	Calmaria	Calma. A fumaça sobe verticalmente	0,00-0,30
1	Quase calmaria	A fumaça se inclina, indicando a direção do vento.	0,30-1,40
2	Brisa	Sente-se o vento na face; as folhas balançam; o indicador da direção do vento se move.	1,40-3,00
3	Vento fresco	As folhas adquirem movimento constante; as bandeiras leves se estendem.	3,00-5,50
4	Vento moderado	Poeira, folhas e pedaços de papel são levantados; os galhos pequenos se movem.	5,50-8,00
5	Vento regular	As árvores pequenas começam a balançar; a superfície das lagoas se encrespa	8,00-11,00
6	Vento meio forte	Os galhos grandes se movem; os fios assobiam; dificuldade no uso de guarda-chuvas.	11,00-14,00
7	Vento forte	Toda a árvore se move; sente-se a resistência ao andar contra o vento.	14,00-17,00
8	Vento muito forte	Brotos e galhos pequenos são arrancados das árvores.	17,00-21,00
9	Ventania	Ocorrem pequenos danos estruturais nas construções; telhas são arrancadas dos telhados.	21,00-25,00
10	Vendaval	Raro; as árvores são quebradas e arrancadas; grandes danos estruturais.	25,00-28,00
11	Tempestade	Muito raro; danos generalizados.	28,00-33,00
12	Furacão		33,00-36,00

Figura 102: Fonte: Silva, 2014.

Existem diferentes tipos de equipamentos para aproveitamento da energia eólica, onde destacamos a utilização da energia elétrica em diversos dispositivos, como bombas d'água, compressores de ar, armazenamento de baterias e sistemas de eletrolisadores.

Esquema geral do aproveitamento da energia eólica

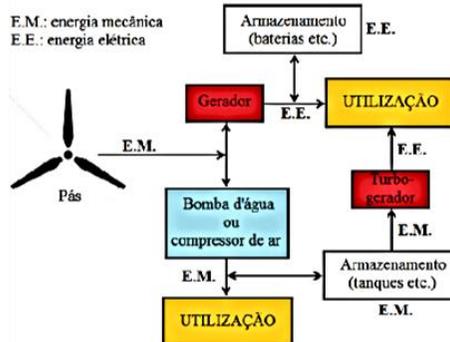


Figura 103: Fonte: Silva, 2014.

Na produção de Hidrogênio Verde, a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, é utilizada para alimentar um eletrolisador, que realiza a eletrólise da água, produzindo o hidrogênio.

O hidrogênio pode ser armazenado em tanques para uso posterior ou utilizado imediatamente em diferentes equipamentos.

Para isso, é necessário utilizar diferentes tipos de rotores elétricos, como demonstrado na figura abaixo.



Figura 104: Fonte: Silva, 2014.

Os rotores elétricos são responsáveis por transformar a energia elétrica em mecânica, que pode ser utilizada em diferentes equipamentos. Dessa forma, é possível utilizar a energia elétrica de forma eficiente e sustentável, contribuindo para a transição energética rumo a um futuro mais verde. A escolha do tipo de rotor, varia de acordo com a localidade e com as eficiências desejadas.

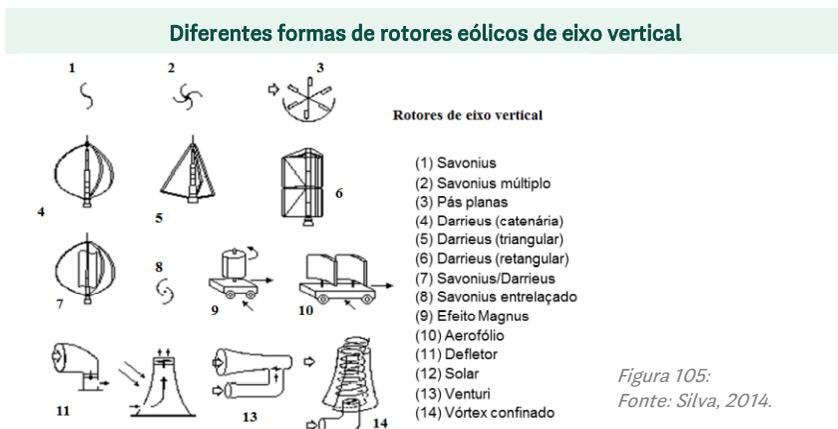


Figura 105:
Fonte: Silva, 2014.

Como funciona o parque eólico *offshore*? É mais ou menos a mesma coisa de como funciona o parque *onshore*, porém com potenciais muito maiores.

Vamos entender o processo de geração e transmissão de eletricidade para utilização em residências.

Primeiramente, a eletricidade é gerada por meio de um gerador e, em seguida, é convertida e transformada pelo conversor e transformador, respectivamente.

Posteriormente, a eletricidade é transmitida por cabos submarinos e chega à subestação, onde é convertida em corrente de alta voltagem e, finalmente, é transportada pela rede de distribuição até as residências.



Figura 106: Fonte: IBERDOLA, 2022

O que é energia eólica *offshore*?

É uma fonte de energia obtida através da força do vento em alto-mar. O vento que sopra no mar é mais intenso que em terra firme, chegando inclusive a dobrar a produção comparado com um parque *onshore*.

Como principais aspectos da geração *offshore*, destacamos:

- O impacto visual e acústico é baixo;
- Dificuldade tecnológica para sua construção;
- As obras e sua manutenção são mais complexas;
- A construção e operação de parques no mar exigem a utilização de meios logísticos muito especializados;

- É mais fácil transportar os diferentes componentes da instalação dos parques no mar;
 - Podem ser utilizados aerogeradores com potências unitárias superiores a 10 MW;
 - Em terra firme aumenta a dificuldade de transporte as potências unitárias de aproximadamente 5 MW.
- Tipos de parques offshore:
 - Aerogeradores *offshore* com fundação fixa;
 - Aerogeradores offshore sobre plataforma flutuante.



Figura 107: Fonte: IBERDOLA, 2022

Podemos as vantagens da energia eólica *offshore* em comparação com a *onshore*. O motivo pelo qual estamos migrando para a eólica offshore é devido às questões de logística e potencial de geração de energia elétrica, além de ser mais fácil de limpar.

O que é energia eólica *offshore*?

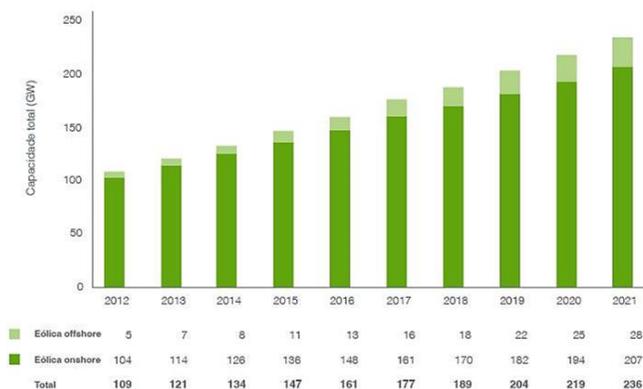
- Fonte de energia é obtida através **da força do vento em alto-mar;**
- O vento que sopra no mar é mais intenso que em terra firme, chegando inclusive a dobrar a produção comparado com um parque *onshore*;
- **O impacto visual e acústico é baixo;**
- Dificuldade tecnológica para sua construção
- As obras e sua manutenção são mais complexas
- A construção e operação de parques no mar exigem a utilização de meios logísticos muito especializados;

- É mais fácil transportar os diferentes componentes da instalação dos parques no mar
 - Podem ser utilizados aerogeradores com potências unitárias superiores a 10 MW;
 - Em terra firme aumenta a dificuldade de transporte as potências unitárias de aproximadamente 5 MW.
- Tipos de parques offshore:
 - Aerogeradores offshore com fundação fixa
 - Aerogeradores offshore sobre plataforma flutuante

Figura 108: Fonte: IBERDOLA, 2022

O crescimento da capacidade total de energia eólica na Europa, 2012-21

O crescimento da capacidade total de energia eólica na Europa, 2012-21



Fonte: WindEurope

Figura 109: Fonte: IBERDOLA, 2022

Já existem turbinas de 15 MW para uso offshore, enquanto na *onshore*, devido às dificuldades de transporte, só é possível atingir até 5 MW. Existem dois tipos de fundações para os aerogeradores *offshore*, fixa e flutuante.

O mais importante na energia eólica *offshore* é que o nível de rugosidade é menor no mar, o que resulta em uma logística mais eficiente e em menor necessidade de torres. Com apenas uma turbina de 15 MW *offshore*, seriam necessárias três torres de 5 MW *onshore* para gerar a mesma quantidade de energia.

Dica de vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=W9l6Mw9qZis&t=15s>
"West of Duddon Sands Offshore Windfarm - Construction & Inauguration"

Ressaltamos que a utilização de fontes renováveis de energia, como a energia eólica, é fundamental para a redução das emissões de gases do efeito estufa e para a transição a um modelo energético mais sustentável.

Além disso, a produção de energia verde também pode contribuir para a produção de Hidrogênio Verde, que é uma fonte de energia limpa e renovável.

8. Paleta de cores do Hidrogênio

Vamos abordar agora a certificação do hidrogênio e suas diferentes cores que indicam a fonte de produção.

O uso de cores define a origem do hidrogênio. Apesar de não ter nenhuma norma internacional que padronize a sua cor a partir de sua forma de produção, há um consenso sobre algumas cores do hidrogênio.



Figura 110: Fonte: North American Council for Freight Efficiency, 2020.

O Hidrogênio Verde é produzido por meio da eletrólise da água com energia renovável, como solar, eólica e hidrelétrica (sendo esta última classificada como verde pelo *North American Council for Freight Efficiency*). No estado do Ceará, as únicas fontes utilizadas são a eólica e a solar.

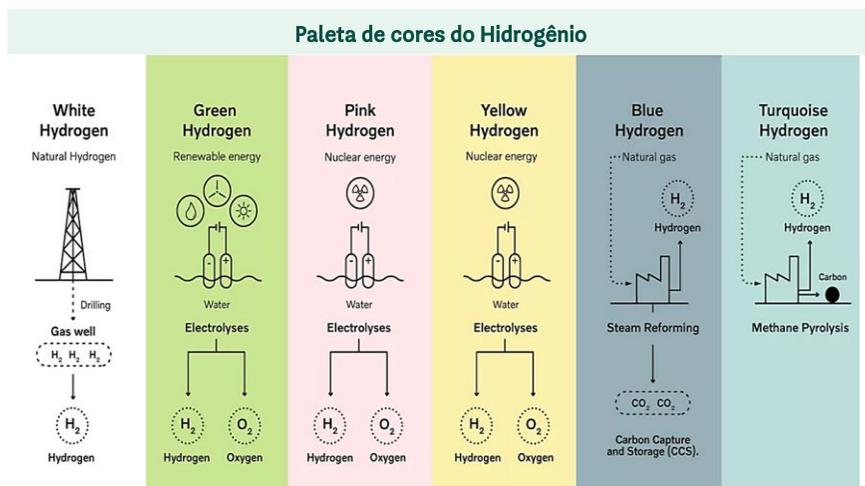


Figura 111: Fonte: Volvo, 2020

As cores associadas ao hidrogênio variam bastante e dependem de vários fatores, como a fonte de produção e o conselho responsável pela classificação.

No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) considera como Hidrogênio Verde apenas aquele produzido por meio de energia solar e eólica, enquanto a Volvo também inclui a hidrelétrica nessa classificação.

Outras cores utilizadas para descrever o hidrogênio incluem o turquesa, o rosa, o preto (produzido a partir do carvão ou petróleo), o cinza (produzido com gás natural), o amarelo (produzido a partir da eletrólise do sistema Grid) e o azul (produzido com sequestro de carbono).

Algumas pessoas classificam o hidrogênio branco como produzido a partir de poços de hidrogênio, mas não há comprovação científica para isso.

É importante destacar que, embora haja essa diversidade de cores, o que realmente importa é a fonte de produção do hidrogênio e se ela é renovável ou não.

Paleta de cores do Hidrogênio

Cor	Resumo do processo de produção do hidrogênio
Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito ¹) sem CCUS ²
Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha ³) sem CCUS
Cinza	Reforma a vapor do gás natural sem CCUS
Azul	Reforma a vapor do gás natural com CCUS
Turquesa	Pirólise do metano ⁴ sem gerar CO ₂
Verde	Eletrólise da água com energia de fontes renováveis (eólica/solar)
Musgo	Reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis com ou sem CCUS
Rosa	Fonte de energia nuclear
Amarelo	Energia da rede elétrica, composta de diversas fontes
Branco	Extração de hidrogênio natural ou geológico

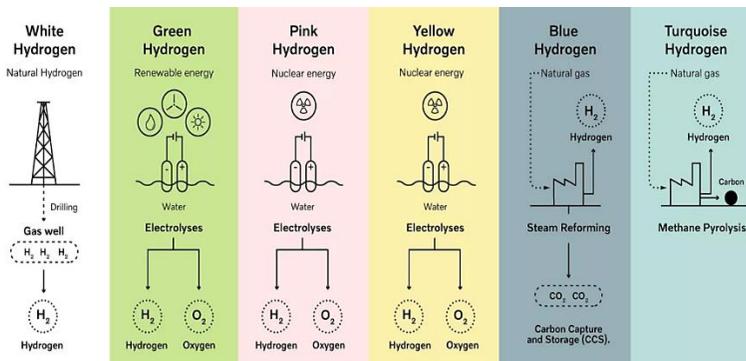


Figura 112: Fonte: Volvo, 2020

Por exemplo, mesmo que um hidrogênio seja classificado como rosa, se ele for produzido a partir de energia nuclear, pode não ser aceito por muitos consumidores e empresas que buscam fontes de energia mais sustentáveis.

Por isso, o importante é avaliar quão renovável é o hidrogênio produzido e se ele causa menos impacto ambiental do que outras fontes de energia.

Além da energia solar e eólica, outras fontes podem ser utilizadas para produzir hidrogênio, incluindo a biomassa e a hidroeletricidade. A tendência é que, no futuro, a classificação do hidrogênio se torne menos importante do que a avaliação da sua sustentabilidade e impacto ambiental.

Uma das formas mais antigas de obtenção do hidrogênio ocorre através da eletrólise da água. O processo de eletrólise é fundamental na produção de Hidrogênio Verde. Para isso, é necessário ter uma logística de uso da água que envolve desde a compra da planta com eletrolisador até os armazenadores, transformações e inversores.

Diagrama esquemático de um processo de eletrólise

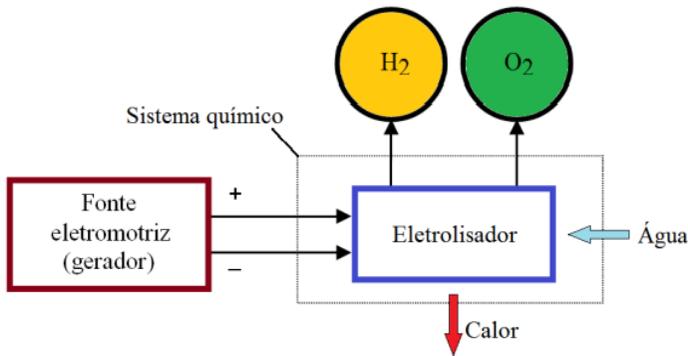


Figura 113: Fonte: Silva, 2014

É importante destacar que a água utilizada no processo precisa ser tratada, pois alguns polímeros e impurezas podem prejudicar a qualidade do hidrogênio produzido.

Através da decomposição da água (H₂O) utilizando energia elétrica em corrente contínua. O H₂ resultante desta decomposição pode ser usado em uma célula a combustível ou como insumo para diversos setores econômicos.

No Ceará, por exemplo, é comum utilizar água do mar, o que exige um processo de dessalinização antes da osmose reversa para garantir que a água esteja adequada para o processo de produção de hidrogênio.

Outro ponto importante é destacar aspectos do eletrolisador. A osmose reversa para água potável já vem no sistema, e o projeto precisa prever dessalinizador para água do mar. Um litro de água é capaz de produzir 1 m³ de hidrogênio ou 11,2 litros de água para produzir 1 kg de hidrogênio.

A seguir, temos um exemplo de produção de eletricidade a partir de uma célula de combustível, um processo que utiliza o hidrogênio como combustível.

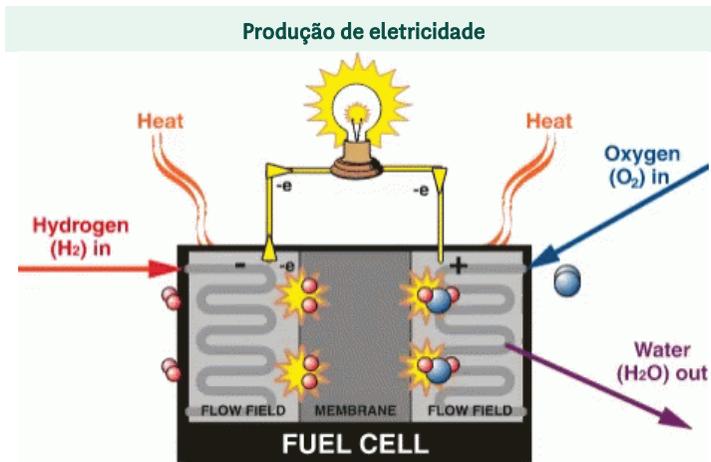


Figura 114: Fonte: Notas de aulas, 2023.

Na célula, o hidrogênio entra e reage com o oxigênio na presença de uma membrana, gerando calor e movimentação de elétrons. Esse processo gera eletricidade e calor, e o subproduto resultante é a água, sendo considerado uma forma limpa e eficiente de produzir eletricidade e uma das aplicações mais comuns do Hidrogênio Verde.

Quanto à “Produção e Distribuição do Hidrogênio”, a rota mais utilizada atualmente é a reforma do gás natural, com 80% do hidrogênio produzido atualmente. Os outros 20% são produzidos pela eletrolise da água a partir da energia da rede de distribuição.

Esta rota tem menor utilização porque o insumo energia é mais cara.

Este input deve ser levado em consideração nas novas formas de geração de energias para produção do H₂ verde, pois impacta na diminuição dos preços do MWh.

Possíveis rotas para produção e utilização do hidrogênio como vetor energético

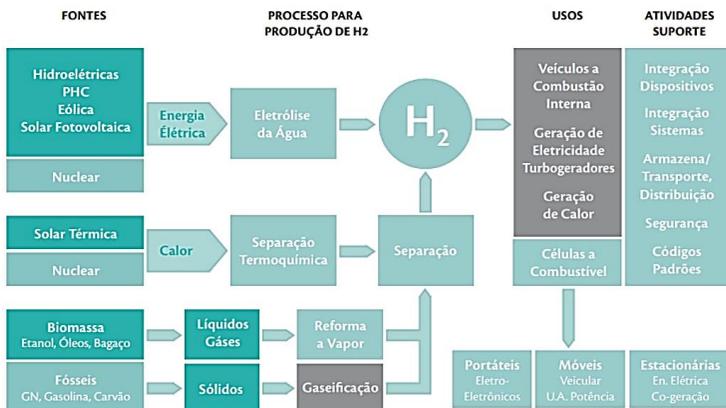


Figura 115: Fonte: CGEE 2009

Do ponto de vista das aplicações industriais do Hidrogênio, há uma oportunidade enorme de transição sustentável em praticamente todas as áreas.

Aplicações do hidrogênio nos principais setores industriais

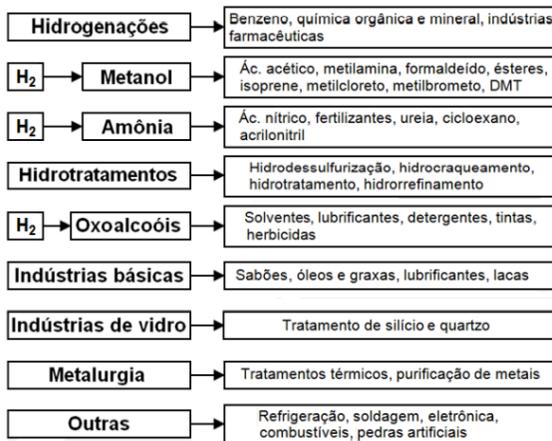


Figura 116: Fonte: Silva, 2014

A produção do hidrogênio no Brasil é praticamente centralizada na PETROBRAS (95%), seja em refino ou para aplicações em fertilizantes

nitrogenados. A produção média anual de H₂ no Brasil é de 6.251.530.000 (Nm³/ano).

O transporte do hidrogênio é o gargalo para sua exportação devido à sua baixa densidade e o gasto energético associado a altas pressões. Destaca-se a potencialidade regional em poder gerar empregos, renda e na formação de mão de obra especializada

9. Sector Coupling (Interligação Setorial)

O Hidrogênio Verde tem papel fundamental na política de transição energética europeia. A forma de sua produção, que pressupõe a utilização de energia renovável, permite uma integração de fontes de energia limpa com setores que, hoje, dependem de combustíveis fósseis, como siderurgia, indústria química e transporte de carga em seus diferentes modais.

Assim, não apenas a produção de H₂V é descarbonizada pela utilização de energia renovável, mas também outros setores que respondem largamente por emissões de gases de efeito estufa (EPBR, 2023).

Sector Coupling é “o processo de interligação progressiva dos setores de eletricidade e gás, otimizando as possíveis sinergias existentes entre geração, transporte e distribuição de eletricidade e gás;

Originalmente desenvolvido na Alemanha, onde foi observado que o setor elétrico vem sendo rapidamente descarbonizado, porém outros setores, como indústria, transporte e edifícios tem maiores dificuldades;

Visa substituir o uso de combustíveis fósseis nos setores com maiores dificuldades, utilizando a eletricidade descarbonizada e armazenamento com gás (metano e hidrogênio).

Este é o fenômeno conhecido pela indústria do H₂V como interligação setorial (*sector coupling*), viabilizado pelo processo *Power-to-X* (PtX).

O termo genérico *Power-to-X* (PtX) designa as diversas tecnologias de transformação do H₂V (*Power*) para aplicações variadas (X), como a

produção de combustíveis sintéticos (*Power-to-liquid*), de gases (*Power-to-gas*) ou de químicos (*Power-to-chemicals*).

Sector coupling e os vários setores que se beneficiam com a descarbonização a partir do Hidrogênio Verde

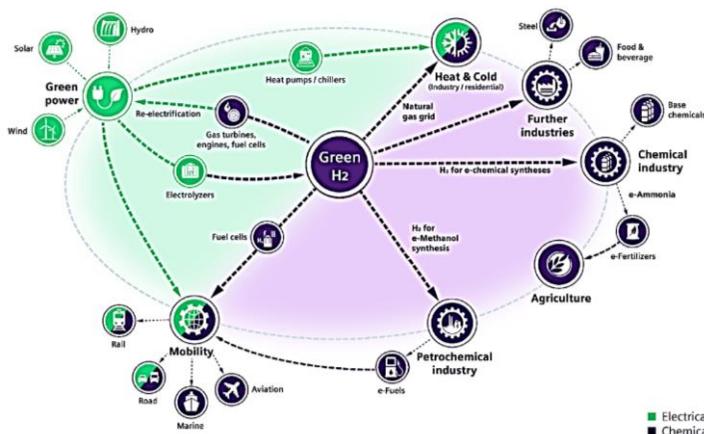


Figura 117: Fonte: Siemens, 2022

Esse processo impulsiona a criação de um novo mercado mundial, em que a exportação de energia renovável se torna uma realidade.

Com um papel de reconhecida liderança, a Alemanha anunciou o objetivo de viabilizar uma demanda de até 110 TWh de Hidrogênio Verde até 2030, enquanto projeta ter capacidade para produzir somente 14 TWh, devido ao seu potencial limitado de geração de energia renovável.

Ciente dessa limitação, a Alemanha estruturou um mecanismo de fomento chamado H2Global, em torno de uma fundação composta por mais de vinte empresas do setor energético e industrial (incluindo algumas que estão presentes no Brasil, como *Siemens Energy*, *ThyssenKrupp* e *Linde*) (EPBR, 2023).

A estratégia para H2V no Brasil é abrangente e efetiva de alcance nacional, considerando as diretrizes propostas pelo Ministério de Minas e Energia (MME) para um Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), e visando a agilidade na tomada de medidas concretas de regulação e fomento.

10. Considerações Finais

Espera-se que este livro tenha servido como uma introdução ao universo do hidrogênio, com um enfoque particular nas "*Energias renováveis e sua integração no H₂Verde*". Em essência, buscamos destacar a importância da análise crítica das energias renováveis no contexto da transição energética, especialmente quando associada ao H₂Verde.

Dentre os tópicos abordados, exploramos a matriz elétrica e energética tanto no Brasil quanto no cenário global. Discutimos a instalação atual e o potencial de expansão dos sistemas eólicos e fotovoltaicos no Brasil, bem como a geração de energia em pequenas e grandes centrais de geração.

Analisamos números relativos à produção e capacidade dessas fontes de energia, e também abordamos a gestão da geração de energia e a produção de hidrogênio. Adicionalmente, discutimos os desafios tecnológicos e ambientais relacionados à implantação de plantas de geração de hidrogênio.

Para aqueles que desejam aprofundar ainda mais seu conhecimento sobre o hidrogênio verde, recomendamos a leitura dos próximos volumes, que oferecerão uma análise detalhada de todos os aspectos envolvidos na implementação eficaz e eficiente dessa tecnologia.

11. Referências

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/ferramentas-interativas>

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (2010). Hidrogênio energético no Brasil. Subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025, tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo>

HOU, Tengfei; ZHANG, Shaoyin; CHEN, Yongdong; WANG, Dazhi; CAI, Weijie. (2015). Hydrogen production from ethanol reforming: Catalysts and reaction mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 44 pp. 132–148.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2013).

Hydrogen Production Using Nuclear Energy. – Vienna: International Atomic Energy Agency

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

<https://www.iea.org/data-and-statistics>

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY

<https://www.irena.org/>

LÓPEZ, Eduardo; DIVINS, Nuria J.; ANZOLA, Andrés; SCHBIB, Susana; BORIO, Daniel; LLORCA, Jordi (2013). Ethanol steam reforming for hydrogen generation over structured catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 38, número 11, pp 4418-4428. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319913003066>

PARNELL, John & BLAMEY, Nigel (2017). Global hydrogen reservoirs in basement and basins. *Geochemical Transactions*. Vol 18 (2) 2017.

SILVA, Fabrícia Maria Santana (2017). Avaliação da Produção de Hidrogênio e Metano a Partir da Codigestão Anaeróbia de Resíduos. Tese apresentada ao PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro

PNE2050 – PLANO NACIONAL DE ENERGIA

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>

WORLD BANK

<https://www.worldbank.org/en/topic/energy>

WORLD ENERGY COUNCIL

<https://www.worldenergy.org/publications>

H2BRASIL



www.quali-a.com/h2brasil



Por meio da:



Apoio:



Organização:

