



VOLUME 2

Hidrogênio Verde (H₂, Pt-X) e outras aplicações: siderurgia, indústria química, agronegócio, uso em habitações, reconversão para eletricidade - célula a combustível estacionária

JULIAN DAVID HUNT, PAULO SMITH SCHNEIDER,
THORSTEN SCHNEIDERS, INGO STADLER,
JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES, AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

Hidrogênio Verde (H2 Pt-X) e outras aplicações:

siderurgia, indústria química, agronegócio, uso em habitações, reconversão para eletricidade - célula a combustível estacionária

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: 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

Hidrogênio Verde (H2 Pt-X) e outras aplicações:

siderurgia, indústria química, agronegócio, uso em habitações,
reconversão para eletricidade - célula a combustível estacionária

Ficha catalográfica

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

Hidrogênio verde (H2 Pt-x) e outras aplicações
[livro eletrônico]: volume 2: Julian Hunt...[et
al.]. -- Brasília, DF : LaSUS FAU, 2023. (Coleção 2:
aplicação do H2 verde no mercado) PDF

Outros autores: Paulo S. Schneider, Thorsten
Schneiders, Ingo Stadler, Júlia T. Fernandes,
Aurélio L. S. Murta

ISBN 978-65-84854-31-4

1. Energia-Fontes alternativas 2. Hidrogênio Verde
3. Sustentabilidade ambiental I. Série.

23-178240

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



Hidrogênio Verde (H2 Pt-X) e outras aplicações:

siderurgia, indústria química, agronegócio, uso em habitações, reconversão para eletricidade - célula a combustível estacionária



Volume 1

Hidrogênio Verde (H2 Pt-X) e Mobilidade



Volume 2

Hidrogênio Verde (H2 Pt-X) e outras aplicações



Volume 3

Legislação e normas de segurança, para produção e usos do H2 não convencionais



Volume 4

Oportunidades de mercados: Nacional e Internacional

**Esse livro tem como referência a transcrição e adaptação das aulas do Curso 2-Módulos 3, H2Brasil, 2023.*

Conteúdo das aulas:

JULIAN DAVID HUNT
PAULO SMITH SCHNEIDER
THORSTEN SCHNEIDERS
INGO STADLER

Adaptação para livro:

JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES
AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

Organização do livro:

KLAUS-PETER ALBRECHTSEN
LOTHAR HOPPE
ROSANA DOMINGUES

Hidrogênio Verde (H2 Pt-X) e outras aplicações: siderurgia, indústria química, agronegócio, uso em habitações, reconversão para eletricidade - célula a combustível estacionária

Dr. Julian David Hunt

King Abdullah University of Science and Technology (KAUST) | julian.hunt@kaust.edu.sa

Graduado em engenharia química na Universidade de Nottingham e doutorado na Universidade de Oxford (Inglaterra). Pós-doutorado no PPE/UFRJ, CNEN, em de Planejamento Energético em sistema de suporte à tomada de decisão de tecnologias de geração elétrica e aumentar a capacidade de armazenamento do sistema interligado nacional; PPGQUI/UFES e foi pesquisador no International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Áustria. Atual pesquisador em KAUST em invenções tecnológicas em hidrogênio, armazenamento energético, gestão hídrica e energias renováveis.

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. Ensino e pesquisa sobre a transição energética, 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. Thorsten Schneiders

Cologne University of Applied Sciences | thorsten.schneiders@th-koeln.de

Possui doutorado pela Ruhr-Universidade de Bochum, Bochum, Alemanha; Pesquisador do Instituto de Energias Renováveis de Colônia e Professor na área de Armazenamento de Energia, Casa Inteligente, Energia Inteligente na indústria energética; Pesquisa nas áreas de energias renováveis nos países em desenvolvimento: fornecimento de energia sustentável com energias renováveis; Energia solar em combinação com geradores a diesel e armazenamento de bateria; Chefe do "Virtual Institute Smart Energy" (VISE), que é uma plataforma para atuação acadêmica e em empresas.

Dr. Ingo Stadler

Cologne University of Applied Sciences | ingo.stadler@th-koeln.de

Possui doutorado e professor de Energias Renováveis e Economia da Energia no Karlsruher Institut für Technologie (KIT) na Alemanha, que combina o ensino e a investigação de uma forma interdisciplinar; Membro do Instituto de Engenharia de Energia Elétrica (IET); Experiência de ensino, pesquisa e projeto na área de Energia Renovável, Armazenamento de Energia, Integração de energias renováveis nas estruturas de abastecimento; Gestão de energia em sistemas de rede e Projetos relacionados ao Brasil com relação a aplicação do Hidrogênio Verde com energias renováveis.

Hidrogênio Verde (H2 Pt-X) e outras aplicações:

siderurgia, indústria química, agronegócio, uso em habitações,
reconversão para eletricidade - célula a combustível estacionária

Dra. Júlia Teixeira Fernandes

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

Arquiteta e Urbanista; Doutora pela FAU-UnB, pesquisadora no LaSUS, LACAM e SiCAC, em Sustentabilidade, Bioclimatismo, Conforto Ambiental, Desempenho Térmico e Lumínio, Eficiência Energética, Qualidade Ambiental e Simulaçã. Consultora 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, do Impact Hub-Brasília.

Dr. Aurélio Lamare Soares Murta

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

Graduado em Eng. Civil, Mestrado em Transportes (IME), Doutorado e Pós-doc em transporte e Planejamento Energético e Ambiental UFRJ. É Professor da UFF em Administração, Coordenador do MBA em Logística Empresarial, Pesquisador do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais/UFRJ. Membro Imortal da Academia Brasileira de Ciências, Artes, História e Literatura (ABRASI). Áreas de atuação: Eng. de Transportes, Planejamento e Operação Logística, Gerenciamento de Projetos, Pesquisa Operacional e Simulação.

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 Bistritzki

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

Doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica pela UFMG, experiência em energia renovável, inovação de biotecnologias, tecnologias de hidrogênio, panorama de patentes.

Me. Francisco Polatscheck

WordWise tradução simultânea e escrita | wordwisebh@gmail.com

Mestrado em Língua Inglesa pela UFMG; Certificate of Proficiency in English (Cambridge); Coordenador de Intérpretes de Conferências (Port < > Ingl; Esp > Port/Ingl).



Por meio da:



Coordenação do curso:



H₂ Power-to-X e outras aplicações

JULIAN HUNT, PAULO SMITH SCHNEIDER,
THORSTEN SCHNEIDERS , INGO STADLER,
JÚLIA FERNANDES, AURÉLIO 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, H_2 , surge então como uma forma de armazenar estas energias. O H_2 , 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 H_2 produzido via eletrólise é denominado H_2 Verde.

Em uma de suas ações, o **Projeto H_2 Brasil Power-to-X** previu a capacitação dos futuros profissionais brasileiros que atuarão na cadeia do H_2 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 H_2 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 H_2 Verde no Brasil. (Rede H_2 Brasil). O público-alvo era professores (mestres e doutores) e instrutores nas áreas correlatas ao H_2 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 H_2 Verde no mercado. Já a etapa presencial focou nos cenários regionais para implantação de tecnologias relacionadas ao H_2 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 H_2 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 H_2 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 H_2 Power-to-X no Brasil.

Klaus P. Albrechtsen

H_2 Brasil Power to X - Programa de Parceria Alemã-Brasileira
Componente: Formação Profissional e Superior para Hidrogênio Verde

Sumário

1.	Visão geral do hidrogênio na indústria	9
2.	Indústria Siderúrgica	28
3.	Processos em siderurgia e metalurgia	38
4.	Indústria Química e Agronegócio	59
5.	Hidrogênio Verde em edifícios	124
6.	Células de combustível: Visão geral do mercado	149
7.	Fornecimento de energia às instalações industriais	157
8.	Referências	199

1. Visão geral do hidrogênio na indústria

1.1. Por quê e onde precisamos descarbonizar a indústria

A descarbonização da indústria é uma necessidade cada vez mais urgente para enfrentar as mudanças climáticas. A produção industrial é responsável por uma grande quantidade de emissões de gases de efeito estufa, principalmente devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis como fonte de energia.

Para descarbonizar a indústria, é preciso adotar tecnologias limpas e renováveis, como a energia solar, eólica, hidráulica, nuclear e, mais recentemente, o Hidrogênio Verde. Além disso, é necessário promover a eficiência energética, a reciclagem de materiais e a redução do consumo de recursos naturais.

A descarbonização da indústria é importante em todo o mundo, mas há regiões que são especialmente dependentes da produção industrial intensiva e, portanto, têm uma maior necessidade de descarbonização. Isso inclui países com forte presença da indústria automotiva, de mineração, siderúrgica, petroquímica e outras atividades com alto impacto ambiental.

A figura a seguir, aborda a importância da redução das emissões de gases de efeito estufa no mundo:

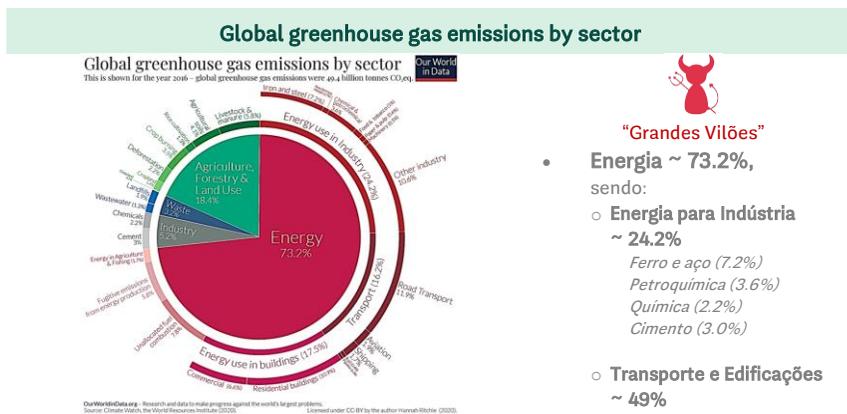


Figura 1: Fonte: CLIMATE WATCH, THE WORLD RESOURCES INSTITUTE. Research and data to make progress against the world’s largest problems, 2020

Em especial, 73% das emissões de CO₂ estão relacionadas à energia, seja ela utilizada em edificações, transporte ou indústria. É importante lembrar que a agricultura e o uso da terra também contribuem para as emissões, mas em menor proporção.

Destaca-se que 24% das emissões são ligadas à indústria de energia, sendo Ferro e aço (7.2%), Petroquímica (3.6%). Química (2.2%) e Cimento (3.0%). Já o consumo de energia no transporte e edificações, são responsáveis por 49% das emissões.

A redução das emissões de gases de efeito estufa e combater o aquecimento global, é um desafio complexo, mas necessário. O gráfico a seguir, representa as contribuições de cada setor para as emissões de CO₂ ao longo do tempo.

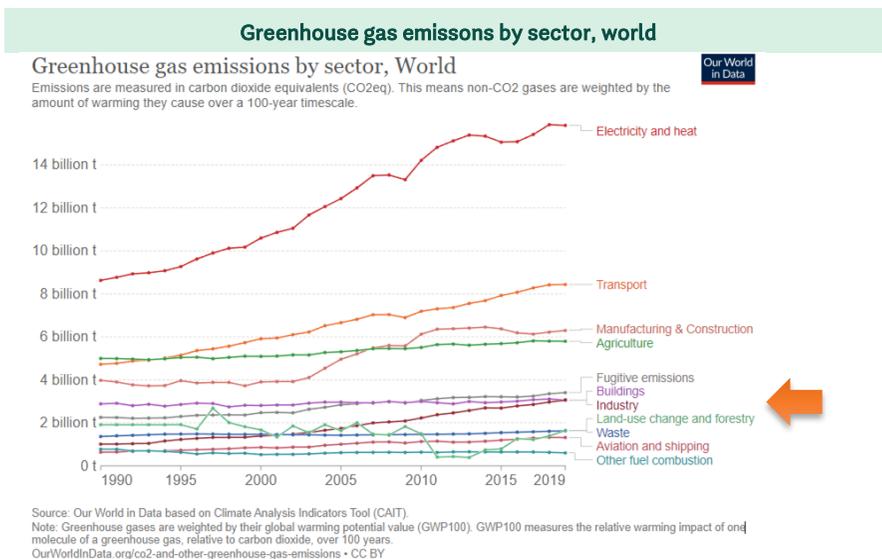


Figura 2: Fonte: Our World in Data based on Climate Analysis Indicators, <https://ourworldindata.org/>

Embora a indústria represente uma porcentagem menor de emissões em relação a outros setores, é importante destacar que ela engloba vários segmentos, como o setor de ferro e aço, siderurgia, petroquímica, química e cimento, que em conjunto são responsáveis por aproximadamente 30% das emissões de CO₂ para a atmosfera.

Outro ponto relevante, é que o setor de resíduos tem uma grande participação nas emissões, mas é difícil mensurá-lo. Por fim, ressalta-se que a aviação e navegação são separadas do setor de transportes para serem tratadas de forma específica, apesar de também serem responsáveis por emissões significativas de CO₂.

Os países têm se comportado de forma diferente em relação às emissões de CO₂ ao longo do tempo. Percebe-se que há uma queda nas emissões de CO₂ na Alemanha um pouco antes de 1950, que coincide com o período da Segunda Guerra Mundial e pós-guerra, como demonstrado no gráfico a seguir.

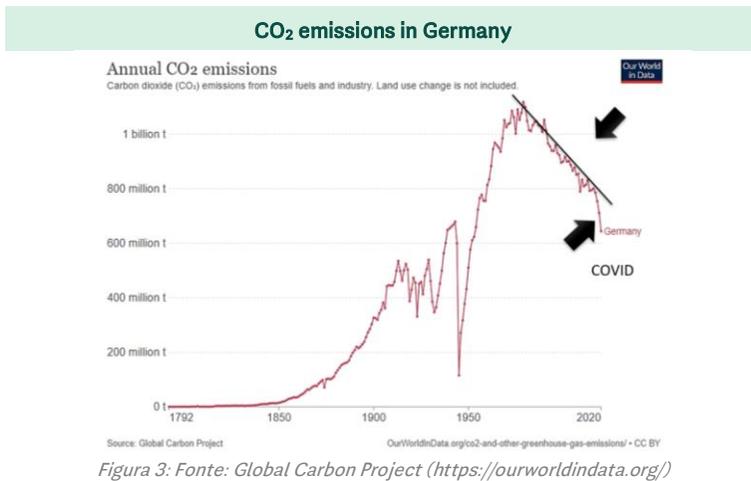


Figura 3: Fonte: Global Carbon Project (<https://ourworldindata.org/>)

Após a guerra, ocorreu uma forte industrialização na Alemanha, mas nos anos 2000, houve uma conscientização e tomada de ações para reduzir as emissões de CO₂, por meio de energias renováveis (eólica e solar).

Percebe-se uma tendência de queda nas emissões de CO₂ na Alemanha, que foi intensificada após a pandemia de covid-19, com a desindustrialização e congelamento de muitas das atividades econômicas.

Já no Brasil, a tendência era de crescimento das emissões, mesmo antes da pandemia de covid-19:

CO₂ emissions in Brazil

Annual CO₂ emissions

Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry. Land use change is not included.

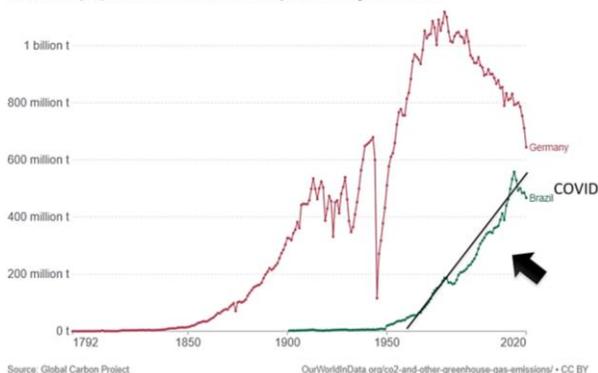


Figura 4: Fonte: <https://ourworldindata.org/>

Isso é preocupante, já que o aumento de emissões de CO₂ está relacionado ao crescimento da atividade econômica. A partir desses dados, percebe-se que o Brasil está se aproximando dos níveis de emissões da Alemanha. Mas, o Brasil precisa acelerar seu crescimento focando na redução de emissões, por meio de energias renováveis, como eólica e solar.

É importante analisar também os dados dos Estados Unidos, como grande potência mundial, em comparação à Alemanha e Brasil:

CO₂ emissions in the United States

Annual CO₂ emissions

Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry. Land use change is not included.

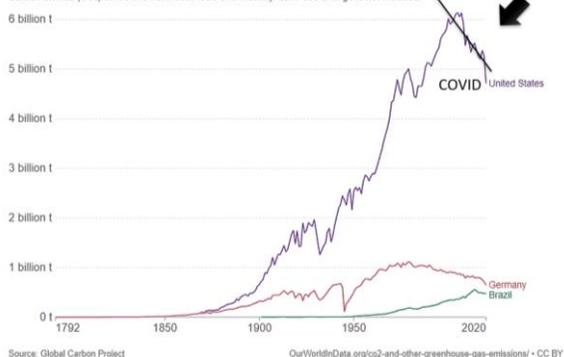


Figura 5: Fonte: <https://ourworldindata.org/>

Os EUA possuem uma tendência de redução, apesar da grande diferença no total de emissões em relação ao Brasil e Alemanha, mesmo analisando as emissões de CO₂ por habitante.

Já a China, demonstra uma tendência de crescimento, e um total muito superior aos EUA. Enquanto muitos países estão se esforçando para reduzir suas emissões de CO₂, a China está na direção oposta. Isso é preocupante, já que o país tem um grande impacto no cenário global, por ser uma potência econômica e industrial, e ter uma grande população.

Enquanto os países desenvolvidos estão buscando reduzir suas emissões, a China e Índia estão em uma crescente emissão de CO₂.

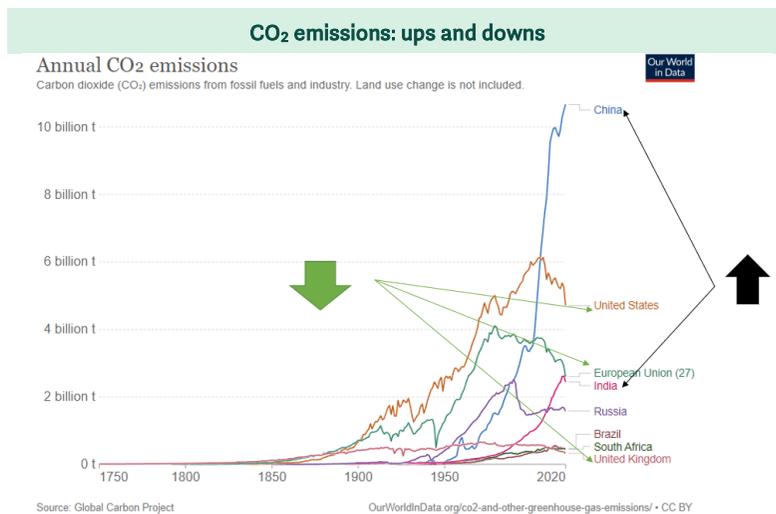


Figura 6: Fonte: <https://ourworldindata.org/>

Diante dessa situação, surge a necessidade de investir em descarbonização dos setores industriais, o que também representa uma oportunidade de atuação profissional. Um exemplo disso é a necessidade de descarbonizar as emissões de CO₂ nos setores industriais, que pode ser alcançada com a adoção de tecnologias como o Hidrogênio Verde, por exemplo.

Emissões industriais de CO₂ nos setores industriais na Alemanha



Figura 7: Fonte: Kempken, T., Setor de acoplamento da indústria de energia com a indústria de aço e cimento, 2021

1.2. Hidrogênio na descarbonização da indústria

Aproximadamente 30% das emissões mundiais de CO₂ vêm de setores industriais ou ligados à indústria. Na Alemanha, por exemplo, cerca de 50% das emissões industriais de CO₂ vêm de setores como o aço, o cimento, as refinarias e a indústria química. Assim, nesses setores concentram-se os esforços e investimentos na descarbonização alemã, com uso de hidrogênio.

Uso do hidrogênio na indústria alemã

Devemos usar hidrogênio como matéria-prima ou como energia?

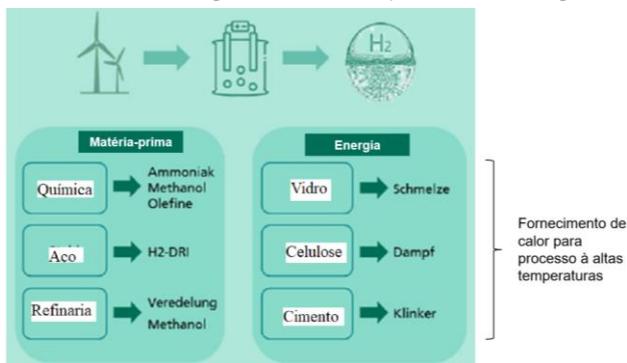


Figura 8: Fonte: H₂-Masterplan for Eastern Germany, Fraunhofer, 2021

Mas será que o hidrogênio é a solução para a descarbonização da indústria no Brasil? Isso é relevante, já que a estratégia alemã não pode ser completamente transposta para a realidade brasileira. É preciso

avaliar o uso atual do hidrogênio na indústria e como ele pode se desenvolver no futuro do país.

O hidrogênio é utilizado como matéria-prima em processos químicos, para produção de aço, refinarias e outros combustíveis. Ele é fundamental para a hidrogenação de combustíveis como o metanol.

Já como energia, o hidrogênio é utilizado em processos de altas temperaturas, como na produção de vidro, celulose e cimento. A temperatura adiabática de chama produzida na combustão do hidrogênio o torna uma opção vantajosa.

O hidrogênio pode substituir o ar atmosférico na combustão e, assim, elevar a temperatura do processo. Isso é feito por meio da oxí-combustão, na qual se oferece oxigênio para a reação, sem o nitrogênio do ar. Embora essa opção tenha um

custo elevado, o uso do hidrogênio pode ser uma alternativa mais eficiente e sustentável para processos de altas temperaturas na indústria.

Potencial para uso de hidrogênio na indústria na Alemanha

Principalmente na indústria pesada, que já fornece infraestrutura para plantas de hidrogênio

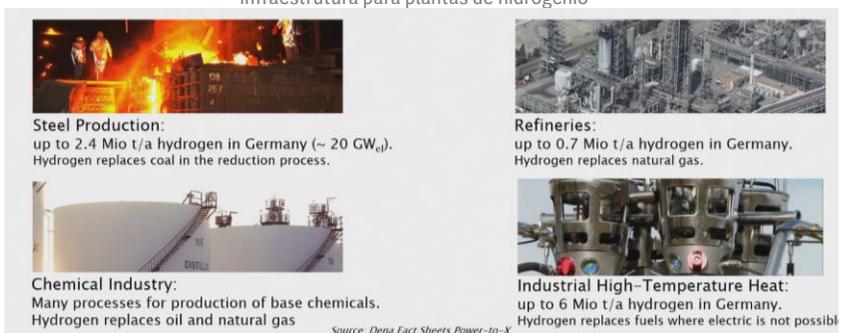


Figura 9: Fonte: Dena Fact Sheets Power-to-x (Notas de aula, 2023)

É importante destacar que na União Europeia o uso do hidrogênio na indústria é principalmente material e não energético, ou seja, é utilizado como matéria-prima em processos produtivos e não como fonte de energia. Existem processos em que o hidrogênio é produzido como subproduto e outros em que ele é fabricado.

Uso atual do hidrogênio na indústria da UE

Principalmente uso material e não-energético

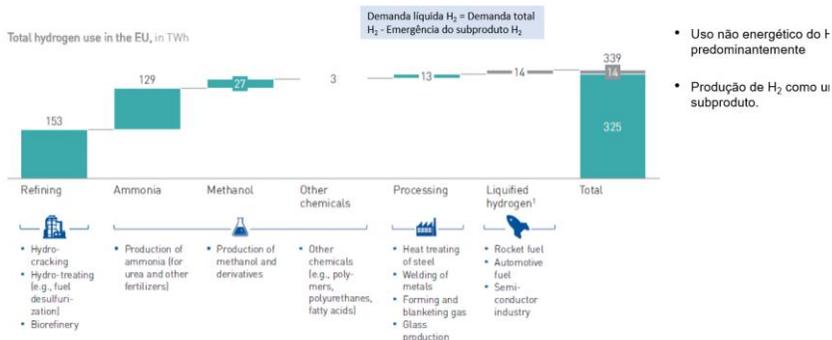


Figura 10: Fonte: FCH JU, Roteiro do Hidrogênio Europa, 2019

De acordo com dados apresentados abaixo, o fornecimento atual de hidrogênio na União Europeia é de 95% baseado em combustíveis fósseis, como gás natural e carvão, ou seja, considerado hidrogênio cinza.

Hidrogênio - fontes e usos hoje

O fornecimento atual de hidrogênio é 95% baseado em combustíveis fósseis (gás natural, carvão).

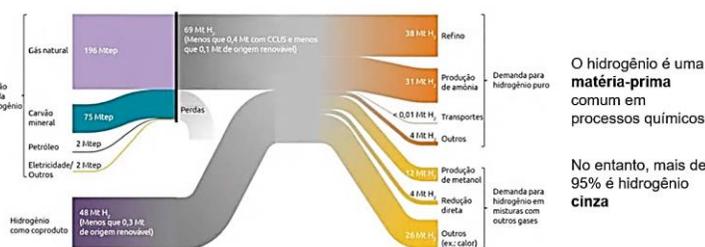


Figura 11: Fonte: Financial Times, The race to scale up green hydrogen, 2021

Além disso, o hidrogênio é utilizado principalmente na indústria química, na produção de fertilizantes, na refinaria de petróleo, na produção de aço e em outras indústrias de alta temperatura. O hidrogênio também é utilizado como combustível em células de combustível para produção de eletricidade e em processos de hidrogenação na indústria química.

Existe uma tendência crescente para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água, utilizando energia solar ou eólica. Assim, para a transição energética, é necessário produzir Hidrogênio Verde, a partir de fontes renováveis. O desafio atual é fornecer Hidrogênio Verde suficiente para atender à demanda da indústria.

A União Europeia tem uma meta de produção de 10 milhões de toneladas de hidrogênio por ano até 2030, sendo que dois terços serão destinados à indústria. É importante lembrar que o uso atual do hidrogênio na indústria como matéria-prima não precisa ser mudado, apenas sua fonte de produção.

Previsão: EU27 fluxo de fornecimento de hidrogênio em 2030

A UE planeja uma meta de produção de 10 milhões de Mt/a, dos quais 2/3 para a indústria

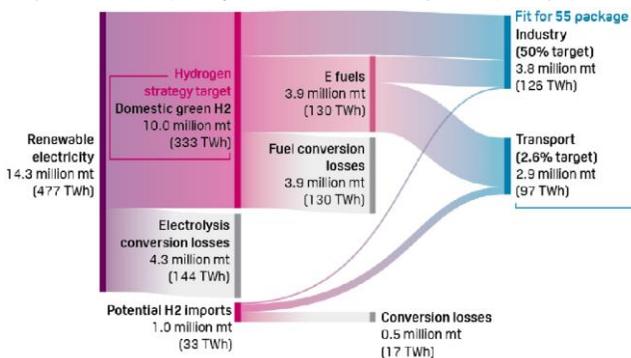


Figura 12: Fonte: S&P Global

Atualmente, há uma iniciativa global para fornecimento de Hidrogênio Verde e sua utilização na indústria e no transporte. Até 8 anos, é esperado um aumento significativo em sua produção e uma redução de 55% nas emissões de gases de efeito estufa. Essa redução é principalmente direcionada para a indústria e o transporte, setores responsáveis por grande parte das emissões globais.

Embora exista a questão de qual setor tem mais influência, a indústria e o transporte têm uma participação significativa nas emissões, sendo mais efetivo concentrar os esforços na indústria devido à sua maior dispersão geográfica. Como resultado, o mundo tem visto um impulso na implementação de projetos industriais de, especialmente na EMEA.

Anunciado pipeline de projetos industriais de hidrogênio em todo o mundo

Projetos industriais ganhando impulso, especialmente na EMEA

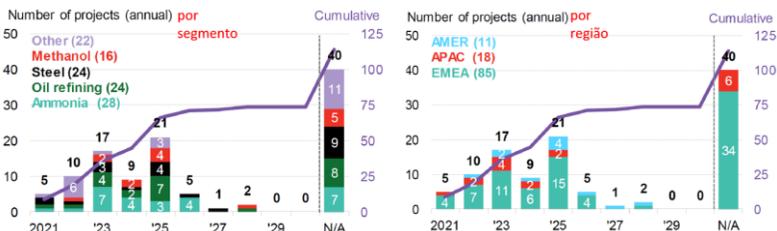


Figura 13: Fonte: Notas de aulas, 2023.

Há um aumento de projetos relacionados ao hidrogênio na indústria, siderurgia, refino, produção de metanol e amônia, utilizada em fertilizantes. As regiões mais envolvidas com esse movimento são América, Ásia-Pacífico e Oriente Médio, sendo esta última região bastante significativa em número de projetos, pois é um grande produtor de petróleo e precisa se atualizar para não perder espaço no mercado.

Na União Europeia, há um cenário promissor para o desenvolvimento da demanda industrial de hidrogênio, principalmente no uso motriz em setores difíceis de reduzir as emissões.

Cenário para o desenvolvimento da demanda industrial de hidrogênio na UE

Uso do hidrogênio de forma motriz em setores difíceis de se abater

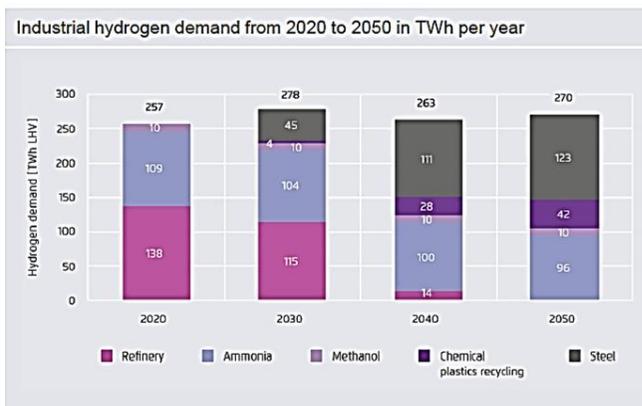


Figura 14: Fonte: Agora Energiewende, Hidrogênio Sem Regressão, 2021

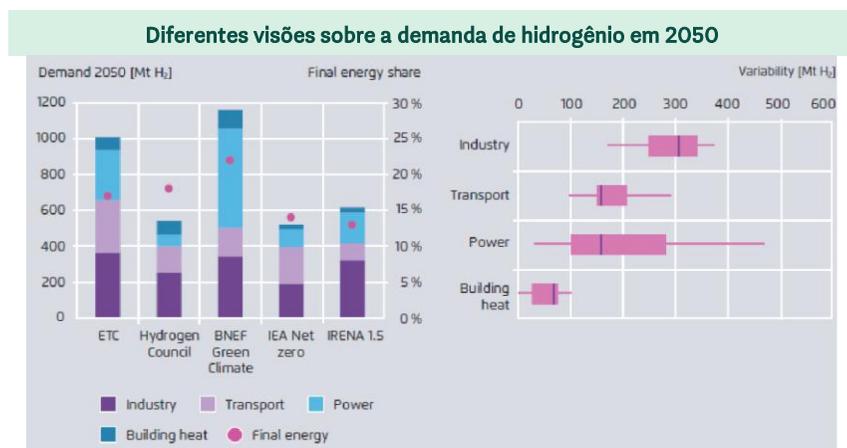
Existem alguns setores que não podem ser facilmente eletrificados, como a indústria química (especialmente amoníaco e metanol) e a produção de aço.

Atualmente, temos uma indústria bem estabelecida de amônia para fertilizantes, que precisa substituir o hidrogênio cinza, proveniente de gás natural, pelo Hidrogênio Verde.

A diminuição da demanda por combustíveis fósseis nos processos de refinarias é obrigatória, mas há muita incerteza nesse processo. Nem sempre, é simples substituir o hidrogênio cinza pelo verde. Em alguns casos, a combustão do hidrogênio não consegue substituir a combustão do carvão por meio do processo térmico, por exemplo, porque possuem comportamentos radiantes completamente diferentes.

Há diferentes visões sobre a demanda de hidrogênio em 2050, mas é certo que a descarbonização da indústria é a aplicação chave do hidrogênio.

Observa-se, a seguir, que existem diferentes fontes de informação, que dão previsões bastante divergentes. Isso ocorre porque fazer previsões para o futuro é sempre incerto, especialmente quando se trata de tecnologias e políticas que ainda não existem.

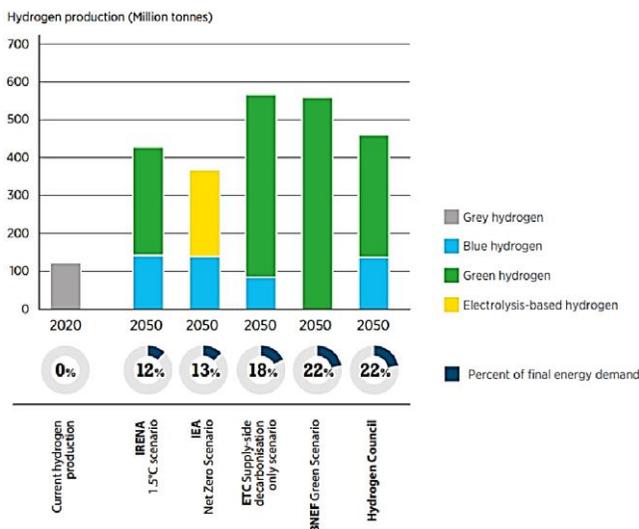


Nota: A energia final não inclui matérias-primas e outros usos não energéticos.

Figura 15: Fonte: Agora Energiewende, Agora Industry, 12 Insights on Hydrogen, 2021, p. 14/fig.6.

Há diferentes previsões sobre a quantidade de Hidrogênio Verde necessário em 2050, mas existe uma pressão crescente para sua utilização devido à necessidade de reduzir as emissões de carbono.

Estimativas da demanda global de H2 para 2050 convergem para 500 milhões de t H2/a



A Agência Internacional de Energia se refere ao hidrogênio "baseado em fósseis com CCUS" (captura, utilização e armazenamento de carbono) e "baseado em eletrólise".

O Conselho de Hidrogênio projeta que 60-80% da produção de hidrogênio será baseada em energias renováveis, com o restante "baixo carbono", que define como "hidrogênio produzido a partir de fontes de energia de origem não renovável com uma pegada de carbono abaixo de um limite definido". A produção atual de hidrogênio inclui hidrogênio criado como subproduto de outros processos".

Figura 16: Fonte: IRENA, *Geopolítica da Transformação de Energia O Fator Hidrogênio*, p.20/fig.1.1., 2022. https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf

A transição energética não é um processo binário e pode ser alcançada através de diferentes tecnologias e opções políticas. Um dos desafios é substituir os combustíveis fósseis por energias renováveis e avançar em direção a uma matriz energética mais sustentável.

1.3. Nível de Prontidão Tecnológica (TRL)

O conceito de Nível de Prontidão Tecnológica (Technology Readiness Level - TRL) é importante para entender o processo de desenvolvimento tecnológico, desde a pesquisa básica até a

comercialização. O objetivo é atingir o nível TRL 9, que significa que a tecnologia está pronta para ser comercialmente explorada e implementada.

Technology Readiness Level – TRL (Níveis de Prontidão Tecnológica)



Figura 17: Fonte: IEA, Global Hydrogen Review 2021, 2021, p.171.

Na figura abaixo, é fundamental entender que as tecnologias passam pelo "vale da morte", entre o TRL5-6. Esse comportamento é identificado em vários setores, desde a indústria até pequenos negócios locais. Uma vez que esse desafio é superado, há maior probabilidade de sucesso.

Technology Readiness Level - TRL (Níveis de Prontidão Tecnológica)

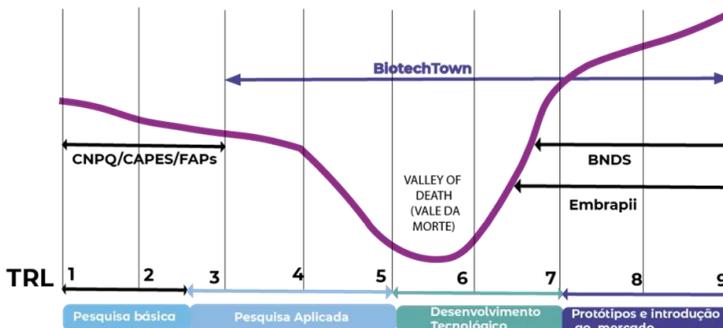
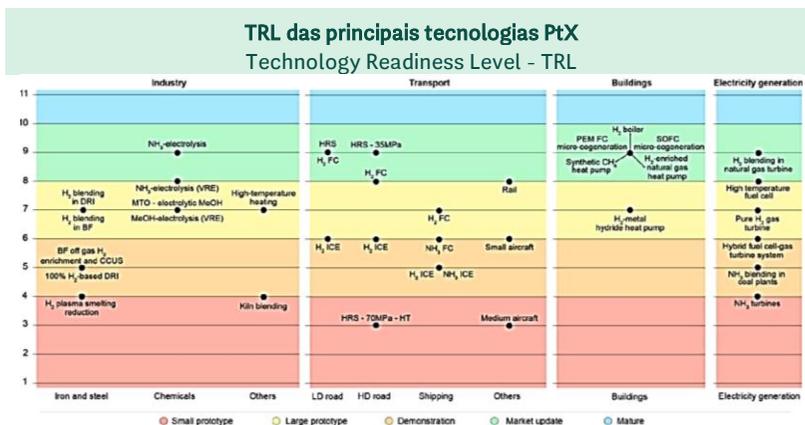


Figura 18: Fonte: IEA, Global Hydrogen Review 2021, 2021, p.171.

Os níveis de TRL são importantes, não apenas para classificar o nível de prontidão tecnológica, mas também para identificar a fase em que o desenvolvimento pode “não evoluir” ou “não passar”. O nível do TRL pode ser aplicado na avaliação de sucesso em áreas, como indústria, construção de edifícios, transporte e geração de eletricidades, por exemplo.



Notas:

- BF = alto-forno.
- DRI = redução direcionada.
- FC = célula de combustível.
- HRS = reabastecimento de hidrogênio.
- HD = heavy-duty.
- HT = alto rendimento.
- ICE = motor de combustão interna.
- LD = light-duty.
- MeOH= metanol.
- MTO = metanoltoolefinas.
- PEM FC = polymer electrolytemembranfuelcell.
- SOFC = célula de combustível oxidefuel sólido.
- VRE = variável de energia renovável.
- Co-geração refere-se à produção combinada de calor e energia. Tecnologia

Figura 19: Fonte: IEA, Global Hydrogen Review 2021, 2021, p.171.

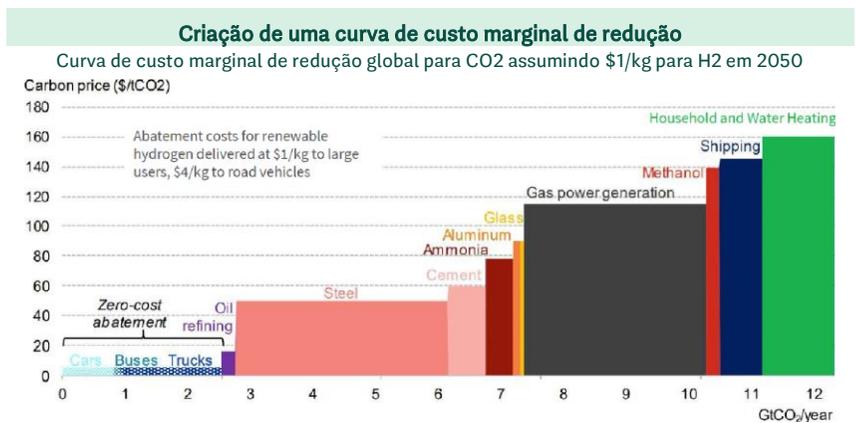
Em relação ao TRL verde, existem várias áreas de interesse, como a utilização de amônia para indústria e eletrólise, bem como as células de combustível, especialmente para transporte. A tecnologia de plasma também é fundamental e está ligada ao hidrogênio.

No transporte, existem desafios para a aviação e trens, embora já haja três trens movidos a hidrogênio em funcionamento na Alemanha. É importante lembrar que a transição para tecnologias mais avançadas pode levar até dez anos para ser concluída.

O gráfico seguinte, apresenta o conceito de custo marginal, que é o custo adicional para introduzir uma nova tecnologia. Em todas as

situações, ele representa o quanto é necessário investir para introduzir uma novidade, sendo o custo marginal de redução de CO₂, considerando um limite de US\$ 1,00 por quilo de H₂ produzido.

Atualmente, o preço do Hidrogênio Verde produzido a partir de fontes solares e eólicas varia entre US\$ 5,00 e US\$ 6,00 por quilo, enquanto o hidrogênio produzido a partir de reforma do gás natural custa em média US\$ 1,00 por quilo.



A curva revela uma economia potencial de CO₂ e o preço necessário do CO₂
 Figura 20: Fonte: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>

O gráfico apresenta a indústria do aço e a indústria do refino como bons candidatos para investimentos, enquanto o transporte marítimo e a geração a gás apresentam custos muito elevados para redução de CO₂. A partir dessa análise, podemos identificar as áreas que oferecem maior potencial para investimentos e as que apresentam maiores dificuldades.

O Hidrogênio Verde é importante como matéria-prima na indústria e atualmente é utilizado na forma de hidrogênio cinza, produzido a partir de gás natural. A transição para o Hidrogênio Verde representa uma grande oportunidade para descarbonização.

Existem setores que dependem do hidrogênio, como a indústria química, e sua eletrificação não é simples. O Hidrogênio Verde pode ser usado em processos de descarbonização da indústria do aço e do refino, por exemplo.

Opções de fácil acesso

Cada país tem condições diferentes, portanto, a escolha prioritária do uso do hidrogênio pode não ser a mesma

Green molecules needed?	Industry 	Transport 	Power sector 	Buildings 	
No-regret	<ul style="list-style-type: none"> Reaction agents (DRI steel) Feedstock (ammonia, chemicals) 	<ul style="list-style-type: none"> Long-haul aviation Maritime shipping 	<ul style="list-style-type: none"> Renewable energy back-up depending on wind and solar share and seasonal demand structure 	<ul style="list-style-type: none"> Heating grids (residual heat load *) 	Vamos lá!
Controversial	<ul style="list-style-type: none"> High-temperature heat 	<ul style="list-style-type: none"> Trucks and buses ** Short-haul aviation and shipping Trains *** 	<ul style="list-style-type: none"> Absolute size of need given other flexibility and storage options 		Vamos pensar nisso!
Bad idea	<ul style="list-style-type: none"> Low-temperature heat 	<ul style="list-style-type: none"> Cars Light-duty vehicles 		<ul style="list-style-type: none"> Building-level heating 	Vamos ter cuidado!

* After using renewable energy, ambient and waste heat as much as possible. Especially relevant for large existing district heating systems with high flow temperatures. Note that according to the UNFCCC Common Reporting Format, district heating is classified as being part of the power sector.

** Series production currently more advanced on electric than on hydrogen for heavy duty vehicles and buses. Hydrogen heavy duty to be deployed at this point in time only in locations with synergies (ports, industry clusters).

*** Depending on distance, frequency and energy supply options

A curva revela uma economia potencial de CO2 e o preço necessário do CO2

Figura 21: Fonte: Agora Energiewende, Agora Industry, 12 Insights on Hydrogen, 2021, p. 12/fig.4.

Seu uso em processos de petróleo e gás é possível, mas a questão é se é possível transformar o negócio de petróleo e gás em uma operação sustentável. Para isso, é importante considerar o conceito de EROEI, que é o retorno em energia sobre energia investida para produzir um determinado combustível.

O EROEI é uma relação que deve ser maior do que 1, o que significa que a quantidade de energia liberada deve ser maior do que a energia gasta para produzir o combustível. Um EROEI próximo de 1 não é interessante. Portanto, é importante buscar um EROEI o mais alto possível.

Em resumo, o Hidrogênio Verde representa uma grande oportunidade para descarbonização em vários setores, mas é necessário considerar questões como o custo marginal e o EROEI para garantir sua viabilidade.

O EROEI é uma medida importante para avaliar a eficiência de uma fonte energética, pois indica a relação entre a quantidade de energia que é liberada e a quantidade de energia que é investida para obtê-la. Um EROEI maior do que 1 é desejável, pois indica que a quantidade de energia liberada é maior do que a investida.

A seguir, é apresentada uma tabela com valores de EROEI (retorno em energia sobre energia investida) de diversos tipos de combustíveis e fontes energéticas, incluindo combustíveis fósseis, fontes não renováveis como a nuclear, e fontes renováveis como coletores solares e biomassa.

EROEI - Energy Return Over Energy Invested

Table 2. Existing magnitude and approximate EROI of various energy resources for the United States, from various sources listed

Resource	Year	Magnitude (EJ/yr)	EROI (X:1)	Reference
Fossil fuels				
Oil and gas	1930	5	>100	2
Oil and gas	1970	28	30	1, 4
Oil and gas	2005	9	11 to 18	2
Discoveries	1970	8	8	1, 4
Production	1970	10	20	1, 4
World oil production	1999	200	35	21
Imported oil	1990	20	35	32
Imported oil	2005	27	18	32
Imported oil	2007	28	12	32
Natural gas	2005	30	10	32
Coal (mine-mouth)	1950	n/a	80	2
Coal (mine-mouth)	2000	5	80	2
Bitumen from tar sands	n/a	1	2 to 4	32
Shale oil	n/a	0	5	32
Other nonrenewable				
Nuclear	n/a	9	5 to 15	32, 51
Renewables				
Hydropower	n/a	9	>100	32
Wind turbines	n/a	5	18	34
Geothermal	n/a	<1	n/a	32
Wave energy	n/a	<<1	n/a	32
Solar collectors				
Flat plate	n/a	<1	1.9	4
Concentrating collector	n/a	0	1.6	4
Photovoltaic	n/a	<1	6.8	52
Passive solar	n/a	n/a	n/a	32
Biomass				
Ethanol (sugarcane)	n/a	0	0.8 to 10	4, 53
Corn-based ethanol	n/a	<1	0.8 to 1.6	26
Biodiesel	n/a	<1	1.3	32

Figura 22: Fonte: Notas de aulas, 2023.

Na tabela apresentada, é possível observar que os combustíveis fósseis possuem um EROEI relativamente alto, o que indica que são fontes energéticas eficientes. No entanto, é importante ressaltar que esses combustíveis são finitos e não renováveis, além de serem responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global.

Por outro lado, fontes renováveis como a biomassa e os coletores solares apresentam um EROEI mais baixo, mas são importantes alternativas sustentáveis de energia. É importante investir em tecnologias que permitam melhorar a eficiência dessas fontes e torná-las mais competitivas em relação aos combustíveis fósseis.

O Hidrogênio Verde é uma alternativa sustentável ao petróleo e gás fósseis, que tem uma diminuição do EROEI ao longo do tempo devido à exploração de mananciais cada vez mais difíceis.

Na indústria do petróleo, no início da exploração, o EROEI era superior a 100, o que significa que se retirava 100 pacotes de energia do combustível e investia apenas 1 pacote para produzir os 100% que seriam utilizados. No entanto, em 1970, o EROEI baixou para 30 e, em 2005, ficou entre 11 e 18. Essa diminuição ocorre porque os mananciais mais fáceis de serem explorados já foram esgotados.

Quando se explora uma grande jazida de petróleo, logo no início, há muita pressão disponível no poço. No entanto, a partir de um determinado momento, é necessário injetar gás ou água para pressurizar o poço e recalcar o petróleo que está lá embaixo. Todo esse processo requer energia, desde o bombeamento até a separação do combustível. Além disso, a exploração em alto-mar é um esforço ainda maior, com profundidades que chegam a mais de 7 mil metros.

No caso do carvão, na década de 1950, o EROEI ainda era alto, em torno de 80 por 1. Ou seja, para cada unidade de energia gasta na produção do carvão, era possível obter 80 unidades de energia em retorno. Isso pode ser tentador para a indústria de energia, mas é importante lembrar que o carvão é um combustível fóssil e que sua exploração pode causar danos ambientais.

O Hidrogênio Verde, por outro lado, é produzido a partir da eletrólise da água utilizando energia renovável, como a solar e a eólica. Dessa forma, não há emissão de gases de efeito estufa e o EROEI pode ser alto. Além disso, a produção de Hidrogênio Verde pode ajudar na transição para uma economia mais sustentável e com menor dependência de combustíveis fósseis.

O carvão, por exemplo, apresenta um EROEI altíssimo, o que torna sua exploração mais fácil e barata. Já o biodiesel tem um EROEI próximo de 1, o que significa que ele praticamente empata na relação entre a energia que é gasta para produzi-lo e a energia que ele pode gerar.

Mas, mesmo que o EROEI do biodiesel seja baixo, ele ainda é uma opção interessante por ser uma fonte de energia renovável. Isso

significa que, mesmo que o balanço energético não seja tão positivo quanto o do carvão, por exemplo, ele ainda pode ajudar a esverdear a matriz energética.

Quando falamos de Hidrogênio Verde, precisamos lembrar que ele pode ser utilizado tanto como matéria-prima para hidrogenar o petróleo e derivados, quanto como fonte energética para a produção de petróleo e gás. No entanto, é preciso considerar que o Hidrogênio Verde ainda é uma fonte de energia em desenvolvimento e, por isso, pode ter um EROEI mais baixo do que as fontes de energia fósseis.

Além disso, mesmo que todo o processo de produção e refino dos derivados de petróleo seja feito de forma sustentável, a queima desses derivados ainda vai gerar emissões de CO₂ fóssil. Por isso, é preciso continuar buscando alternativas mais limpas e renováveis para a produção de energia.

Em resumo, o Hidrogênio Verde pode ser uma ótima opção para reduzir as emissões de gases poluentes na indústria de energia, mas é preciso avaliar sua viabilidade e eficiência considerando o EROEI e a pegada de carbono de todo o processo produtivo.

É possível introduzir o Hidrogênio Verde na produção de petróleo como fonte de hidrogênio para a hidrogenação dos compostos. Esses hidrogênios podem ser provenientes de processos verdes de produção de hidrogênio, diminuindo assim o impacto ambiental.

O EROEI é usado nos estudos de análise de ciclo de vida, que avaliam o impacto ambiental desde o início ao fim de um processo.

É importante lembrar que o EROEI não é um indicador único e existem listas enormes de indicadores em respeito à emissão que também são muito interessantes de serem trazidos ao fazermos uma avaliação.

O EROEI de um painel fotovoltaico é em torno de 7, o que significa que ele ainda consome muita energia. É importante pensar no tempo de uso do painel ao fazer o EROEI, pois ele não pode ser instantâneo.

Os painéis fotovoltaicos têm vida útil de cerca de 20 anos e, ao final desse período, produzem sete vezes mais energia do que a usada em sua produção. No entanto, é importante lembrar que a quantidade de

energia gasta na produção instantânea de um painel é muito grande e que a produção energética por metro quadrado é baixa. Apesar disso, a tecnologia fotovoltaica é promissora e apresenta um EROEI positivo, ainda que não tão alto quanto o da hidrelétrica.

Por sua vez, a hidrelétrica é uma tecnologia tradicional e bem conhecida, com um EROEI superior a 100. Embora possa parecer cara, ela já está em uma fase de baixo consumo energético, o que significa que é uma tecnologia madura e estável.

Embora o fotovoltaico apresente um EROEI positivo, ele tem uma densidade de energia baixa e uma parcela significativa de energia gasta na sua produção. Já a hidrelétrica apresenta um EROEI muito alto e é uma tecnologia bem estabelecida e confiável.

2. Indústria Siderúrgica

A indústria siderúrgica é um setor que está sob pressão para descarbonizar suas operações e reduzir suas emissões de gases de efeito estufa. Diante disso, surge a questão: como o Hidrogênio Verde pode ajudar a descarbonizar a indústria siderúrgica?

A indústria do aço é um grande emissor de CO₂ – cerca de 2t CO₂ por tonelada de aço com contribuição de 11% das emissões globais de CO. Portanto, a indústria siderúrgica tem que participar da descarbonização.

Quando falamos em emissões de CO₂, estamos falando de emissões fósseis, ou seja, que não fazem parte do ciclo natural do carbono na atmosfera e no campo.

Além disso, a indústria siderúrgica também é responsável por 5% das emissões de monóxido de carbono (CO), um gás perigoso na atmosfera, pois pode se combinar com outras substâncias, formar ácidos ou ser corrosivo.

Apesar disso, o CO ainda tem conteúdo de energia e pode ser utilizado como combustível se for completamente oxidado. No entanto, muitas vezes há combustão incompleta e as emissões de CO não são

controláveis. Por isso, a indústria do aço é considerada uma candidata importante para descarbonização.

Nesse sentido, o Hidrogênio Verde pode desempenhar um papel importante na redução das emissões de CO₂ e CO na indústria siderúrgica. O hidrogênio pode ser utilizado como fonte de energia limpa e substituir os combustíveis fósseis utilizados atualmente no processo siderúrgico, reduzindo as emissões de CO₂ e CO.

É importante ressaltar que a utilização de Hidrogênio Verde na indústria do aço ainda é um desafio, e é necessário um grande esforço para aprimorar as tecnologias existentes e desenvolver novas soluções. No entanto, a introdução do Hidrogênio Verde pode representar um avanço significativo na descarbonização da indústria siderúrgica e na luta contra as mudanças climáticas.

Por um lado, a indústria siderúrgica, embora altamente concentrada em poucas unidades ao redor do mundo, possui um valor econômico elevado. Cada uma dessas unidades é uma fábrica de capital e recursos investidos. Além disso, a competitividade é um fator importante nesse setor, pois todas as empresas estão lutando para reduzir seus custos.

No entanto, essa redução nem sempre está relacionada a processos limpos, e muitas vezes a sustentabilidade é sacrificada em prol da competitividade.

Para alcançar o equilíbrio entre competitividade e sustentabilidade, a engenharia tem o papel de trabalhar com esses dois fatores opostos e encontrar um meio-termo. É nesse contexto que se fala cada vez mais em "aço verde", que é produzido sem o uso de combustíveis fósseis e, portanto, é mais sustentável.

A longa vida útil e o planejamento das plantas requerem longos tempos de espera para as decisões de investimento.

O termo "aço verde" é usado para se referir à produção de aço usando processos sustentáveis e não baseados em combustíveis fósseis. A indústria siderúrgica é uma indústria de capital intensivo e é dominada por poucos grupos financeiros e tecnológicos.

Isso significa que o retorno do investimento é muito lento e as implementações de tecnologias novas podem levar décadas. Por isso, muitos ciclos de investimento devem ser planejados até 2050.

No entanto, a indústria siderúrgica já se comprometeu a implementar estratégias para reduzir suas emissões de carbono.

Como tornar a indústria siderúrgica verde? A resposta não é simples, pois envolve trocar processos e combustíveis. É preciso avaliar as tecnologias disponíveis atualmente e buscar formas de produzir aço de maneira mais sustentável. Essa é uma questão importante que precisa ser respondida, para que a indústria possa cumprir suas metas de zerar as emissões de carbono e contribuir para um futuro mais limpo.

No contexto do aço verde, a Boston Metal é uma startup apoiada pelo fundo de capital de risco de Bill Gates e pela Vale, que pretende usar tecnologia eletroquímica para produzir aço de forma mais sustentável.

Noticias sobre Boston Metal e "Aço verde"

Figura 23: Fonte: www.capitalreset.com/startup-de-aco-verde-vai-estreitar-tecnologia-no-brasil/

Diferente do processo tradicional, que utiliza coque derivado do carvão mineral, a tecnologia da Boston Metal usa eletricidade como fonte de energia, produzindo oxigênio puro como subproduto. Isso reduziria as emissões de gases de efeito estufa, que representam cerca de 7% a 8% do total emitido pela siderurgia.

No entanto, é importante lembrar que essa ainda não é a solução definitiva para a descarbonização da siderurgia, e que o investimento em captura e sequestro de carbono também é uma estratégia importante. É preciso ficar atento e avaliar cuidadosamente as informações divulgadas pela mídia para entender se correspondem à realidade técnica do que está sendo desenvolvido na indústria do aço.

O termo "aço verde" é cada vez mais utilizado no mundo da siderurgia como uma forma de produzir aço de maneira sustentável e com uso de energia renovável. A empresa *Aço Verde Brasil* é um exemplo, que investe em tecnologias e práticas sustentáveis em sua produção de aço. A empresa investe em energia renovável, modernização de suas usinas e tratamento de água.

Empresa Aço Verde Brasil (AVB)



HISTÓRIA

A Aço Verde do Brasil, empresa do Grupo Ferroeste, nasce como um player competitivo de aço com a filosofia de sustentabilidade como carro-chefe de suas estratégias, pautada pela inovação e melhoria constante de produtos e processos, assegurando operações livres de combustíveis fósseis (zero carbon footprint). Somos a primeira empresa do planeta a produzir aço sem a utilização de combustíveis fósseis.

A AVB visa abranger novos mercados, através do incremento de sua planta fabril para atender novos perfis de clientes. Os principais produtos no mercado são o Fio máquina e Vergalhão CA 50.

NASCEMOS VERDE!
Evitamos a emissão de milhões de toneladas de CO₂ no meio ambiente pelo uso de biocarbono e gases de processo.



Figura 24: Fonte: <https://avb.com.br/a-avb/>

Um ponto importante é que muitas empresas utilizam o termo "aço verde" em sua comunicação, mas é necessário avaliar se essa produção realmente é sustentável e se utiliza apenas energia renovável. Por exemplo, a Aço Verde Brasil produz ferro-gusa que é baseado em energia renovável, mas ainda gera emissões de CO₂.

Assim, é importante questionar e avaliar como as empresas estão produzindo o "aço verde", e se essa produção é realmente sustentável e utiliza apenas fontes de energia renovável. Ainda há muito a ser

discutido e aprimorado na busca por uma siderurgia mais sustentável e com menos impactos ambientais.

O Grupo Ferroeste realizou a verticalização da produção do ferro gusa através do “aço verde”, conceito criado para um aço produzido 100% com energia renovável.

Para isso, o grupo investe maciçamente no setor florestal e na modernização da Usina de Aços Longos – Aço Verde do Brasil, em Açailândia, no estado do Maranhão.

A cidade de Açailândia é um grande polo produtor de ferro-gusa com capacidade de 1,0 milhão de toneladas por ano. A AVB atua no Estado do Maranhão desde 1990 e hoje gera mais de 2.300 empregos diretos.

Na AVB, os **gases dos altos-fornos** são utilizados no forno de reaquecimento da laminação e recentemente a AVB iniciou a construção de uma **planta de geração de energia elétrica**, que poderá gerar até 50% da energia consumida pela usina através de uma caldeira movida pelos gases dos altos-fornos.

Estes gases alimentam a caldeira da usina, onde é totalmente queimado, em ambiente fechado, produzindo **energia de baixo custo e reduzindo o efluente gasoso gerado na produção de ferro-gusa**.

A AVB possui três estações de **tratamento de água**, onde 95% da água direcionada ao consumo industrial é tratada e reutilizada.

A empresa IBERDROLA destaca que o aço verde é um material importante para iniciar a descarbonização industrial e reduzir as emissões de CO₂, que representam cerca de 7% das emissões globais. Contabilizar as emissões de CO₂ na indústria siderúrgica é um desafio, mas o aço verde é uma solução promissora para reduzir o impacto ambiental desse setor.

Aço verde na Iberdrola



O aço verde: um material para iniciar sua descarbonização industrial e aumentar as fronteiras da eletrificação

A indústria do aço gera 8 % das emissões de CO₂ provocadas pelo homem no mundo. Por essa razão, urge iniciar um processo de descarbonização que, além disso, possa se converter em uma grande oportunidade econômica. A Iberdrola, em sua aposta em um mundo mais sustentável, já está trabalhando junto a agentes do setor do aço em projetos pensados para minimizar seu impacto.



Figura 25: Fonte: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/aco-verde>

Segundo a IBERDROLA, é necessário fazer o controle das emissões de CO₂ e destaca dois dos processos mais promissores para isso, que têm a eletricidade renovável como protagonista. Mencionam novamente o Hidrogênio Verde, como uma solução. É importante ressaltar que ler informações em sites é algo comum, mas é fundamental ter uma visão analítica e crítica para avaliar a veracidade das informações apresentadas.

Descarbonização do Aço

A DESCARBONIZAÇÃO DO AÇO

.....

As primeiras medidas para reduzir as emissões do aço passam necessariamente por fazer um uso mais eficiente do mesmo e aumentar sua taxa de reciclagem, mas essas ações não são suficientes.

As projeções para o futuro indicam que seguirá sendo necessário satisfazer pelo menos a metade da demanda de aço a partir do mineral de ferro, o que torna imprescindível desenvolver novas tecnologias mais ecológicas.

Dois dos processos mais prometedores têm a eletricidade de origem renovável como protagonista.

Na Europa, já existem vários projetos — Hybrit ou H₂ Greensteel, por exemplo — que pretendem substituir os combustíveis fósseis por [hidrogênio verde](#).

Nos Estados Unidos, a empresa Boston Metal, que surgiu do Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), está desenvolvendo a eletrólise direta do mineral de ferro, um processo semelhante ao usado atualmente para o alumínio. Em ambos os casos, a eletricidade necessária vinha de **fontes renováveis**, garantindo a sustentabilidade e a ausência de emissões durante o processo.

Figura 26: Fonte: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/aco-verde>

2.1. Desafios para a indústria siderúrgica mundial

A indústria siderúrgica é uma das mais poderosas do mundo, mas também é uma das responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa em grande escala. Mesmo assim, é importante destacar que cada pessoa consome cerca de 10 toneladas de aço ao longo da vida, o que equivale a aproximadamente 10 automóveis populares.



Figura 27: Fonte: Notas de aula, 2023.

A demanda por aço é crescente e nem toda essa demanda pode ser suprida apenas por meio da reciclagem. A produção mundial de aço atualmente é de cerca de 1.900 milhões de toneladas.

Produção mundial de aço

Brasil entre os Top 10, produção similar como a Alemanha

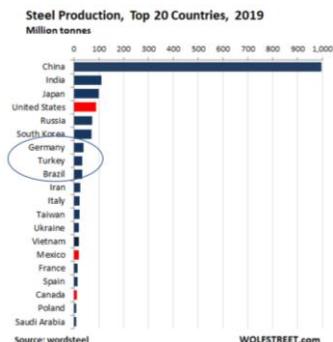


Figura 28: Fonte: Wolfstreet.com

A China é o maior produtor mundial de aço, com uma produção 10 vezes maior do que o resto do mundo.

Já a Coreia do Sul, mesmo sem ter muitos recursos minerais, é uma potência industrial, exportando muito aço e produzindo muitos produtos com ele, como carros e navios.

Os Estados Unidos, por outro lado, deixaram de ser um grande produtor de aço e se especializaram em pesquisa e desenvolvimento, royalties de desenvolvimentos tecnológicos, capital financeiro e gestão de capital.

O Japão também não tem muitos recursos minerais e é um país muito industrializado.

Conforme imagem a seguir, o Brasil ocupa a nona posição no ranking mundial, sendo o maior produtor no hemisfério sul. Isso se deve à grande quantidade de minério disponível e à disponibilidade de energia, apesar de não ser um país muito industrializado.

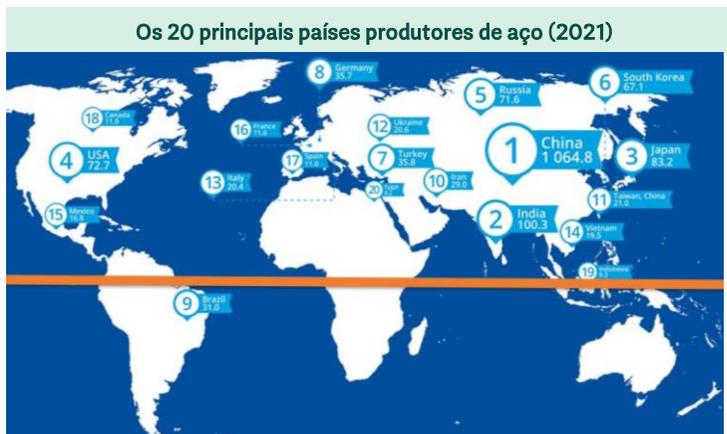
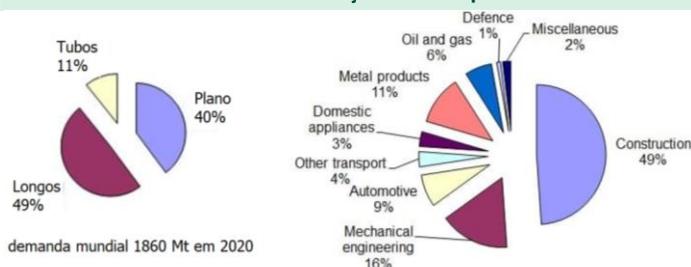


Figura 29: Fonte: Notas de aula, 2023.

2.2. Para que o aço é necessário no mundo?

O aço produzido pode ser encontrado em diversos formatos, como tubos, barras e aços longos. Outra forma comum é o aço plano, que passa por diversas transformações antes de ser utilizado. A principal aplicação do aço é na indústria da construção civil, sendo utilizado em estruturas de prédios, pontes, rodovias, entre outros. O consumo de aço é grande nesse setor, sendo uma das principais demandas pela produção desse material.

Análise da demanda mundial de aço em 2020 por indústria de uso final



2020 world steel demand analysis by end-use industry

Figura 30: Fonte: Notas de aula, 2023.

A figura seguinte, analisa a produção de aço e a demanda de energia primária necessária para sua produção, e observa-se a enorme participação do carvão, representado em azul. Também há uma forte participação de combustíveis líquidos, em verde-claro. Já o gás natural é representado em verde-escuro.

Demanda de energia primária na produção de aço primário

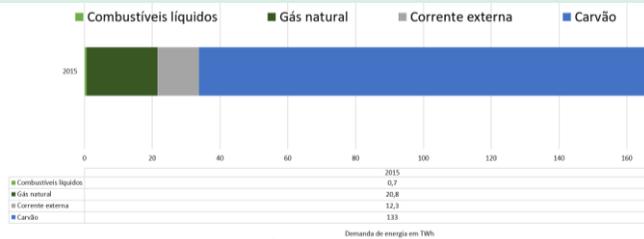


Figura 31: Fonte: Perfil da Indústria de Aço, BMWI:

https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbriefstahl.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Se somarmos o verde-escuro do gás natural com o azul do carvão, percebemos o quão dependente da energia fóssil é a produção de aço. Ainda há uma parcela chamada corrente, que se não vier de fonte renovável, também é uma fonte primária fóssil. Isso significa que praticamente toda a produção de aço é baseada em combustível fóssil, o que torna a indústria siderúrgica um grande emissor de gases de efeito estufa.

A Alemanha foi um dos países pioneiros na produção de aço e é considerada uma das grandes potências siderúrgicas do mundo até os dias atuais. A indústria siderúrgica alemã é responsável pela criação de processos e tecnologias que revolucionaram a produção de aço, como o forno a arco elétrico e o processo de produção de aço a oxigênio.

Consumo de eletricidade na indústria siderúrgica: Alemanha e UE

	Alemanha	União Européia
Produção de aço	42,4 milhões t /ano (2018)	168,1 milhões t / ano (2018)
Demanda de eletricidade da indústria siderúrgica	13 TWh/ano	51,5 TWh
Demanda total de energia	590 TWh/ano (2018)	3249 TWh (2018)
Participação da indústria siderúrgica no consumo total de eletricidade	aproximadamente 2,20%.	aproximadamente 1,59%

Figura 32: Fonte: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>

Esses avanços permitiram uma produção mais eficiente e com menor emissão de gases poluentes. Além disso, a Alemanha foi um importante exportador de aço durante o século XX, e sua indústria siderúrgica continua sendo uma das mais importantes do mundo, com destaque para as empresas ThyssenKrupp e Salzgitter.

No mundo, a indústria é responsável por cerca de 36% das emissões de gases de efeito estufa, e a indústria siderúrgica é responsável por 25% dessas emissões. Isso corresponde a uma parcela de 7% a 10% das emissões totais de CO₂ equivalente no planeta.

Emissões globais de CO₂

A indústria siderúrgica global emitiu cerca de 3,6 gigatoneladas de emissões de CO₂ (Gt CO₂) em 2019

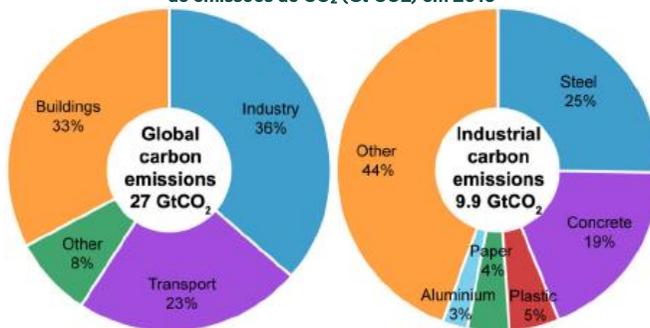


Figura 33: Fonte: Notas de aula, 2023.

O mercado siderúrgico é altamente competitivo, e a China lidera a produção mundial, mas o Brasil tem um papel importante, juntamente à Alemanha. Como uma indústria chave, a produção de aço gera muito valor agregado em relação à produção de minério. No entanto, é importante atacar as emissões dessa indústria para alcançar a meta de descarbonização.

Para alcançar esse objetivo, é necessário adotar medidas para descarbonizar a produção de aço. O Hidrogênio Verde surge como uma alternativa promissora para reduzir as emissões de CO₂, já que pode ser produzido a partir de fontes renováveis de energia, como a energia eólica e solar. Além disso, o Hidrogênio Verde pode ser usado como um combustível limpo na produção de aço, substituindo o carvão e outros combustíveis fósseis. No entanto, ainda há desafios a serem superados para a produção em larga escala do Hidrogênio Verde e sua aplicação na produção de aço.

3. Processos em siderurgia e metalurgia

No processo de produção de aço, existem duas rotas principais: a rota da redução em alto forno e a redução direta. Essas rotas são determinantes para saber se é possível produzir aço verde.

A redução em alto forno é a rota tradicional, que utiliza o carvão como fonte de energia e emite grandes quantidades de gases de efeito estufa. Já a redução direta utiliza gás natural ou hidrogênio como fonte de energia e pode ser considerada uma rota mais limpa e sustentável.

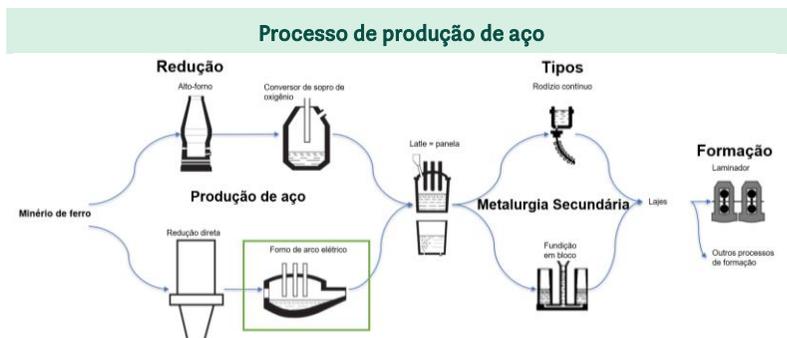


Figura 34: Fonte: Lohse 2016 Stahlbau

A seleção da rota de produção desempenha um papel fundamental na fabricação do aço. Se a rota escolhida não for ambientalmente responsável, o processo não resultará na obtenção de aço sustentável. Portanto, é de grande importância concentrar os esforços na fase inicial de redução, na qual o minério de ferro é convertido em ferro.

Minério, conhecido como óxido de ferro, é extraído de minas



Figura 35: Fonte: Notas de aula, 2023

O minério de ferro é extraído das minas na forma de óxido e, em seguida, é tratado para limpar, triturar e adicionar aditivos, a fim de apresentá-lo em um formato industrial utilizável nas operações seguintes.

A pelletização é um processo que envolve a combinação de finos de minério de ferro, com tamanho inferior a 200 mesh (0,074 mm), com aditivos como a bentonita. Em seguida, esses materiais são moldados em esferas quase ovais/esféricas, com diâmetros que variam entre 8 mm e 16 mm, por meio de um pelletizador.

Posteriormente, essas esferas são endurecidas por meio de queima com um combustível. Esse método transforma os finos de minério de ferro em "pelotas de minério de ferro de tamanho uniforme", que podem ser diretamente utilizadas em alto-fornos (BF) ou em fornos

verticais ou rotativos, normalmente empregados na produção de ferro reduzido direto (DRI). As pelotas de minério de ferro são ilustradas na Figura.

O minério de ferro é triturado, misturado com aditivos, moldado em bolas e "cozido".

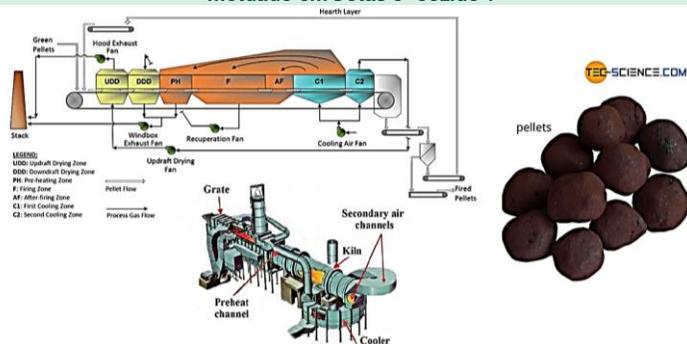
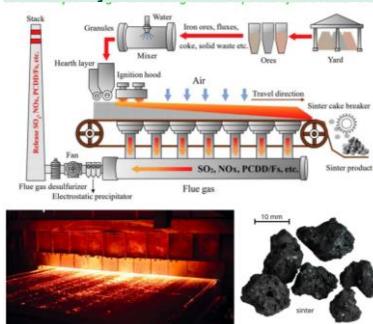


Figura 36: Fonte: Notas de aula, 2023

Nesta etapa, é necessário o uso de energia elétrica, o que abre a possibilidade de empregar fontes renováveis, como a energia elétrica de fontes eólica ou solar. Além disso, o processo de tratamento pode envolver o uso de calor, que pode ser eventualmente combinado com hidrogênio em fases posteriores, embora essa etapa inicial não seja a que demanda maior consumo de energia.

No processo de fabricação de aço, uma etapa posterior é a sinterização, que consiste na recuperação de correntes residuais geradas ao longo do processo.

O uso de sinterização no lugar de minério granulado e pelotas ajuda a reduzir a taxa de combustível do alto-forno e as emissões de CO2



Esse procedimento é denominado Sinter e desempenha um papel fundamental na redução do desperdício de materiais e no aumento da eficiência da produção de aço.

Figura 37: Fonte: <http://www.carmeuse-steel.com/your-applications/sintering-iron-ore>

É crucial observar dois aspectos significativos na imagem seguinte.

As principais matérias-primas são minério de ferro, coque e cal, sofrendo várias reações para produzir ferro-gusa



O coque é gaseificado substoichiometricamente em alto-forno - e o minério de ferro é reduzido. O ferro-gusa líquido e a escória se acumulam na área inferior do alto-forno.

Figura 38: Fonte: Notas de aula, 2023

Em primeiro lugar, destaca-se o tamanho impressionante dessa instalação. Trata-se de uma grande estrutura, localizada em proximidade a áreas urbanas. Sua dimensão é imensa e resulta na emissão de uma considerável quantidade de gases, abrangendo não apenas gases de efeito estufa, mas também outros poluentes prejudiciais.

Além disso, essa instalação opera em altas temperaturas. Você sabe qual é a temperatura mínima para que um corpo emita luz visível aos nossos olhos? Qualquer corpo com temperatura acima do zero Kelvin emite radiação, sendo essa radiação classificada como infravermelha, pois está abaixo do espectro de cores visíveis pelos nossos olhos.

Nossa visão se estende do vermelho ao violeta, com o vermelho sendo o limite inferior. enxergamos apenas uma pequena parte do espectro de radiação emitida pelos corpos, e essa emissão está diretamente relacionada à temperatura do corpo. A capacidade de vermos essa radiação ocorre quando o corpo atinge uma temperatura que permite a emissão de luz no espectro visível aos nossos olhos.

O processo de produção de aço envolve diversas etapas, e uma delas é a obtenção do ferro-gusa, um tipo de ferro bruto com alto teor de carbono. Ele não é utilizável diretamente, sendo necessário submetê-lo a etapas seguintes para transformá-lo em aço ou em ferro fundido. Isso ocorre porque o teor de carbono do ferro-gusa não é adequado para a maioria das aplicações industriais.

Ferro-gusa / Ferro bruto



O termo "ferro-gusa" deriva da velha maneira de lidar com o ferro fundido. Ele era escoado diretamente do forno para dentro de canais abertos que se alimentavam em inúmeros canais curtos em ambos os lados, levando uma ligeira semelhança a uma porca que mamava leitões de ferro.

O ferro-gusa era quebrado da porca quando sólido. Uma pequena quantidade de ferro frio é ainda hoje conhecida como ferro-gusa. O termo "metal quente" é usado para denotar ferro fundido.

O ferro-gusa tem um alto teor de C que precisa ser reduzido nas próximas etapas do processo.

Figura 39: Fonte: Notas de aula, 2023

O ferro-gusa contém cerca de 90-95% de ferro elementar junto a vários outros elementos principalmente carbono (3,0-4,5%), silício, fósforo, manganês e enxofre – em proporções variáveis dependendo das composições das matérias-primas e do modo de funcionamento de um alto-forno.

A composição exigida para a fabricação de aço difere daquela exigida para o uso em fundições para a fabricação de peças fundidas de ferro.

Apesar de não ser utilizável diretamente, o ferro-gusa é uma etapa importante do processo de produção de aço, pois é a partir dele que se inicia a produção do material. No entanto, a obtenção do ferro-gusa é uma das etapas mais energívoras e emissoras de gases poluentes de todo o processo.

Quando se produz ferro-gusa a partir de um alto-forno, outro subproduto gerado é a escória, um material que contém alumínio, manganês e outros minerais indesejados para a fabricação do aço. No entanto, a escória pode ser aproveitada para outros fins.

No processo de fabricação, a escória atinge altas temperaturas, no mínimo 800°C, o que a torna um grande problema ambiental quando é depositada em locais inadequados.

A escória é utilizada como material de construção



Figura 40: Fonte: Notas de aula, 2023

Existem vários processos para tratar a escória, incluindo o resfriamento, que consome muita água. Portanto, o tratamento de água é importante na indústria do ferro e do aço.

O conversor de oxigênio desempenha a função de transformar o ferro-gusa em aço, exigindo um processo de redução de carbono para alcançar as propriedades desejadas no aço.

Redução de carbono necessária para obter aço com propriedades adequadas

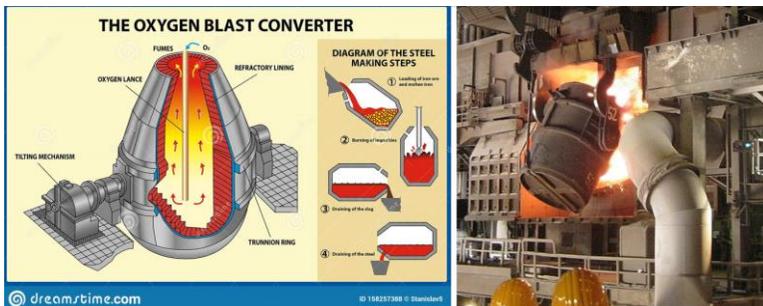


Figura 41: Fonte: Notas de aula, 2023

Um dos dispositivos empregados é o cadinho, cuja função é conter o ferro-gusa em temperaturas extremamente elevadas, aproximadamente 1.500°C.

É evidente que esse equipamento possui dimensões gigantescas e opera com uma grande quantidade de energia. É fundamental ressaltar que o manuseio do cadinho é conduzido com extrema precaução e proteção, devido às elevadas temperaturas e à emissão de gases tóxicos durante o processo.

Aqui temos um exemplo que ilustra a significativa quantidade de energia envolvida em processos industriais. Na imagem, podemos notar roletes que refletem a luz ambiente, ao lado de uma barra que emite sua própria radiação, predominando nas cores vermelha e amarela.

**Conversor de oxigênio converte ferro-gusa em aço,
que é a base para o processamento posterior dos produtos siderúrgicos**



Figura 42: Fonte: Notas de aula, 2023

Isso indica que a barra está operando em uma temperatura consideravelmente alta, atingindo aproximadamente 1.000°C . É importante destacar que a radiação é emitida por qualquer corpo que possua uma temperatura diferente de zero Kelvin, sendo categorizada como infravermelha, uma vez que se situa abaixo do espectro de cores visíveis aos nossos olhos.

3.1. Siderurgia via alto forno

No processo de fabricação de ferro-gusa através do alto-forno, é necessário ter os seguintes componentes: minério de ferro, carvão e sinter. O carvão utilizado no processo possui várias composições, dependendo da sua procedência. No caso do carvão do Rio Grande do Sul, que é uma das principais reservas do país, o seu conteúdo inerte é muito alto, chegando a 55% de cinzas, o que torna a sua utilização para a produção de energia pouco eficiente.

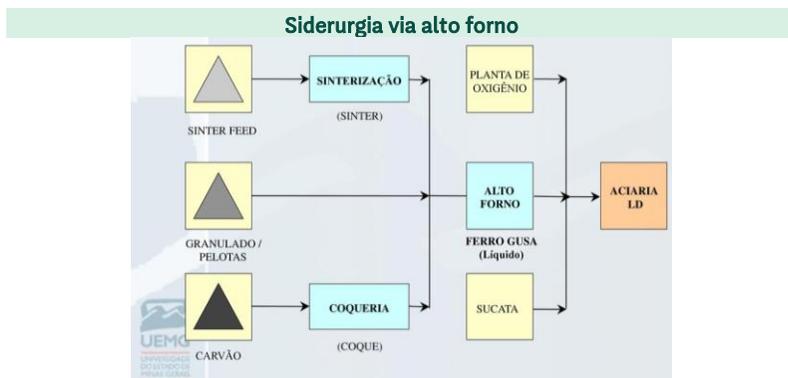


Figura 43: Fonte: Notas de aula, 2023

Já o carvão da Colômbia (Alemanha) é considerado de excelente qualidade, pois possui apenas cerca de 6% de cinzas e um conteúdo de carbono muito alto. Esse carvão é ideal para a produção de coque, um concentrado de carbono usado no processo de produção de ferro-gusa. No entanto, é necessário fazer a sua limpeza para utilizá-lo como coque. Esse processo de limpeza é feito com carvão de boa procedência, que já possui um conteúdo de carbono elevado.



Figura 44: Fonte: Notas de aula, 2023

O processo de produção de ferro-gusa começa recebendo o carvão, o minério de ferro e alguns aditivos. Esses aditivos são necessários tanto para a coqueria quanto para a sinterização. A coqueria é o processo de transformar o carvão mineral em coque, que é um concentrado de carbono utilizado como combustível no alto-forno.

Já a sinterização é um processo auxiliar que utiliza minérios de ferro de baixa qualidade para produzir o sinter, que é um material granulado utilizado como fonte de ferro no alto-forno. É importante lembrar que

a qualidade desses insumos é fundamental para a eficiência e a sustentabilidade do processo produtivo.



- É constituída por um conjunto de fornos dispostos lado a lado, onde o carvão mineral é depositado, permanecendo por cerca de 16 horas a 1300° C sem contato com o ar.
- Durante o aquecimento os componentes voláteis do carvão são destilados e evaporados.
- O material sólido que resta nos fornos é uma massa de **carbono**, denominada **coque**.
- O **coque** é retirado dos fornos e esfriado na estação de apagamento.

Figura 45: Fonte: Notas de aula, 2023

A coqueria é responsável por produzir o coque, um material sólido composto por carbono. Esse coque é fundamental para o processo de produção de ferro-gusa, pois é uma fonte de carbono necessária para a reação química que ocorre no alto-forno.



- O **sinter** é produto da aglomeração a quente de pequenas partículas de minério de Ferro em mistura com fundentes e finos de coque.
- O **sinter** é uma forma de carga preparada para uso em altos-fornos de grande porte.

Figura 46: Fonte: Notas de aula, 2023

No processo de produção de ferro-gusa, temos a sinterização como um processo auxiliar. Ela é responsável por pegar as partículas finas do coque com alguns aditivos importantes para serem usados como carga nos altos-fornos. O objetivo não é estudar todo o processo siderúrgico, mas sim entender como podemos descarbonizar essa indústria.

Siderurgia via alto forno

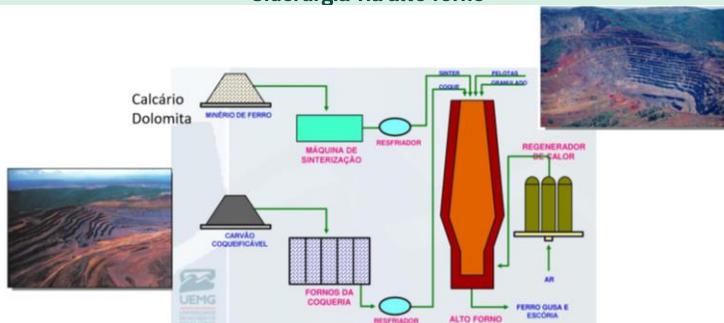


Figura 47: Fonte: Notas de aula, 2023

No processo de produção de ferro-gusa por alto-forno, é necessário alimentá-lo com minério de ferro e carvão, além de outros minerais obtidos por meio de mineração. O minério de ferro é a matéria-prima principal para a produção do ferro-gusa, enquanto o carvão é utilizado como fonte de energia e para produzir o coque, que é um material sólido rico em carbono.

Os outros minerais adicionados podem variar de acordo com a composição desejada do ferro-gusa. O objetivo final é produzir um ferro-gusa líquido de alta qualidade que possa ser utilizado em processos posteriores para a produção de aço.

Na figura abaixo, temos um alto-forno:

Processos em siderurgia

Publicado em 11 de maio de 2022

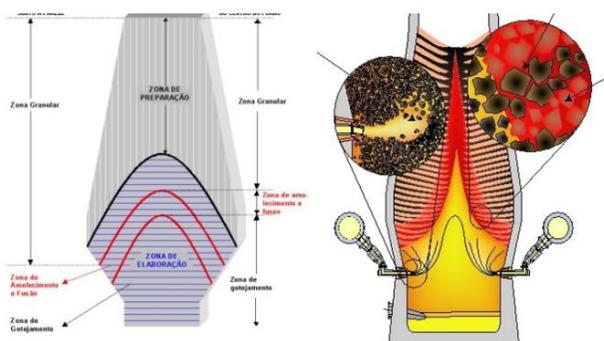


Figura 48: Fonte: Notas de aula, 2023

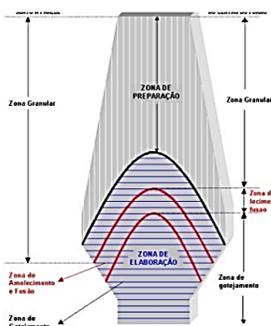
Ele é um equipamento gigante, que recebe minério de ferro por cima e carvão ou coque por baixo, onde é gerada uma combustão parcial que gera monóxido de carbono (CO) como um subproduto. Essa combustão libera energia e é responsável pela redução do minério de ferro, transformando-o em ferro-gusa líquido.

O processo ocorre em duas regiões diferentes do alto-forno. A região superior, onde é colocada a carga de minério de ferro, é mais fria e permite que o material vá descendo aos poucos até a região inferior, onde é mais quente e onde a carga de carvão/coque é adicionada e inflamada para gerar a combustão parcial.

Vale lembrar que o CO gerado durante o processo tem um alto potencial energético e pode ser utilizado para a produção de Hidrogênio Verde, por exemplo, através de processos de reforma a vapor. Essa é uma das possibilidades de descarbonização da indústria siderúrgica e é uma das aplicações mais promissoras do Hidrogênio Verde.

No processo de produção de ferro-gusa, o alto-forno é alimentado por minério de ferro e carvão/coque, além de outros minerais obtidos por mineração. O alto-forno possui uma região quente e uma região fria. O minério é adicionado na região mais fria e vai descendo aos poucos.

Reação química que produz ferro fundido



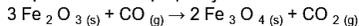
Reação química que produz o ferro fundido é:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$$

Etapa 1- Ar pré-aquecido no forno + carbono do coque



Etapa 2 – zona de preparação



Etapa 3 – zona de elaboração

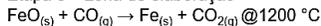


Figura 49: Fonte: Notas de aula, 2023

Na região quente, é adicionado o carvão/coque, que passa pelo processo de combustão incompleta, gerando CO (monóxido de

carbono) que é um agente redutor. Esse CO vai reduzir o óxido de ferro original e transformá-lo em ferro-gusa, além de liberar CO₂.

O processo de produção de ferro-gusa é altamente energético e libera CO₂ fóssil. Para torná-lo descarbonizado, seria necessário utilizar coque de origem renovável. No entanto, produzi-lo é um processo pouco eficiente energeticamente, o que pode tornar a indústria pouco competitiva. O coque de origem fóssil é mais barato, mas possui um alto impacto ambiental.

O coque é adicionado na zona de elaboração em fase sólida e recebe ar ambiente, gerando energia e CO. Esse CO é um agente redutor que retira o oxigênio do óxido de ferro, transformando-o em ferro-gusa e liberando CO₂. É importante ressaltar que o processo de produção de ferro-gusa é complexo e apresenta diversos desafios ambientais e energéticos a serem superados.

O alto-forno é responsável por transformar minério de ferro em ferro-gusa, utilizando como agentes redutores o coque e o CO. A reação ocorre em diversas etapas, começando com a introdução do coque em fase sólida na zona de elaboração, onde ocorre a combustão e liberação de CO. Esse CO é um agente redutor, que tende a retirar o oxigênio do óxido de ferro presente no minério.

A primeira fase de redução ocorre a 850°C, onde é gerado o FeO, e a segunda fase acontece em temperaturas mais altas, em torno de 1.200°C, com maior presença de CO, resultando na formação do ferro-gusa. É importante ressaltar que todo esse processo libera CO₂ fóssil, já que o coque utilizado é de origem não renovável. Para tornar a produção de ferro-gusa mais sustentável, é necessário utilizar coque de origem renovável ou outras alternativas mais eficientes e menos poluentes.



Figura 50: Fonte: Notas de aula, 2023

Existem duas rotas tecnológicas para produzir o ferro a partir do minério de ferro. Uma delas é a rota do alto-forno, que produz o ferro-gusa líquido, e a outra é a rota da redução direta, que produz o ferro-esponja.

O ferro-esponja é um ferro isolado que não tem a mesma característica do ferro-gusa, mas ambos são utilizados pela indústria siderúrgica e são ferros já limpos, sem o oxigênio.

A produção do ferro-esponja é baseada em minas de minério de ferro e é feita por meio de um processo de redução direta que utiliza gás natural. É importante lembrar que, atualmente, essa rota tecnológica é muito dependente de combustíveis fósseis, o que torna necessário buscar alternativas mais sustentáveis, como o Hidrogênio Verde, para produzir o ferro-esponja de forma mais limpa e com menor impacto ambiental.

Redução por H_2

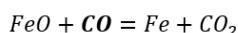
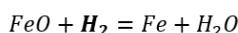
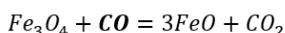
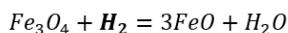
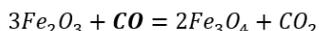
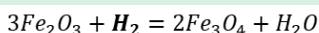


Figura 51: Fonte: Notas de aula, 2023

Na rota de redução direta, o processo é diferente do alto-forno. Aqui, o objetivo é produzir ferro-esponja, um ferro isolado e limpo, sem

oxigênio. A sua produção depende de minério de ferro e é baseada em gás natural.

O processo começa com a reforma do gás natural, que permite a separação do hidrogênio. Esse hidrogênio é usado para reduzir o óxido de ferro ($\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$), produzindo água como subproduto, em vez do CO_2 produzido na rota do alto-forno. Continuando a oferecer hidrogênio, o óxido de ferro é cada vez mais reduzido, chegando-se ao ferro-esponja, que é um ferro puro, e cujo produto final também é a água.

Assim, na rota de redução direta, o hidrogênio assume o mesmo papel que o CO na rota do alto-forno, sendo utilizado como agente redutor para produzir ferro limpo e eliminar a produção de CO_2 .

Origem do CO e do H_2

Reforma de gás natural

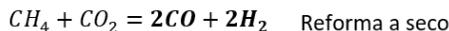


Figura 52: Fonte: Notas de aula, 2023

Para produzir hidrogênio a partir do gás natural, é necessário realizar um processo chamado reforma a vapor da água. Nessa etapa, o metano é combinado com vapor de água, gerando hidrogênio e uma pequena quantidade de CO. É possível optar por capturar o CO_2 gerado nessa reação ou finalizá-la sem capturá-lo, essa escolha depende da estratégia adotada.

Nesse processo, o hidrogênio é produzido a partir do gás natural, mas se houvesse outra fonte de produção de hidrogênio, essa poderia ser utilizada. Essa opção é importante para a descarbonização da produção de ferro, principalmente se for utilizada na rota de redução direta.

Na indústria siderúrgica, existem dois processos principais para produzir o ferro: o alto-forno e a redução direta. No alto-forno, o minério é alimentado com Sinter e coque, enquanto na redução direta,

é utilizado principalmente gás natural ou carvão para produzir hidrogênio.



Figura 53: Fonte: Notas de aula, 2023

O produto do alto-forno é o ferro-gusa, que passa por um conversor de oxigênio para produzir aço. Já o produto da redução direta é o ferro-esponja, que passa por um forno elétrico para se transformar em aço.

Esses são processos convencionais na indústria siderúrgica, sendo que o alto-forno é alimentado por minério, sinter e coque, enquanto a redução direta é alimentada principalmente por gás natural ou carvão. Cada um desses processos tem suas particularidades, mas ambos têm como objetivo a produção do aço.

3.2. Processo de fabricação de aço:

Passos de processamento do minério de ferro via ferro-gusa até o aço - 1 tonelada de aço libera cerca de 1,85 toneladas de CO₂:



- Transformação do **minério de ferro** (Fe_2O_3) → em **Ferro Fe**
 - altos-fornos → aço processo básico de conversão de oxigênio
- Etapas intensivas em energia → CO₂ e ENERGIA de combustíveis fósseis
- Altos-fornos utilizam o carbono (COQUE) → CO₂ é subproduto da produção de ferro.

Figura 54: Fonte: Notas de aula, 2023

Nesta linha de produção de aço via ferro-gusa, o processo começa com a extração do minério de ferro, que passa pelo alto-forno para produzir o ferro-gusa e, posteriormente, pelo conversor de oxigênio para chegar ao aço. Porém, essas etapas são muito intensivas em energia e, por isso, liberam grandes quantidades de CO₂, exigindo o uso de combustíveis fósseis, como o coque.

Isso torna difícil a descarbonização dessa rota de produção de aço, uma vez que o agente redutor CO, proveniente do coque, também é fóssil. Para descarbonizar essa rota, seria necessário encontrar um material renovável que pudesse substituir o carvão e o coque como elemento redutor, o que não é apenas um problema relacionado à energia, mas também aos insumos utilizados no processo.

O processo CO₂ é responsável por 50% do total de emissões de CO₂:

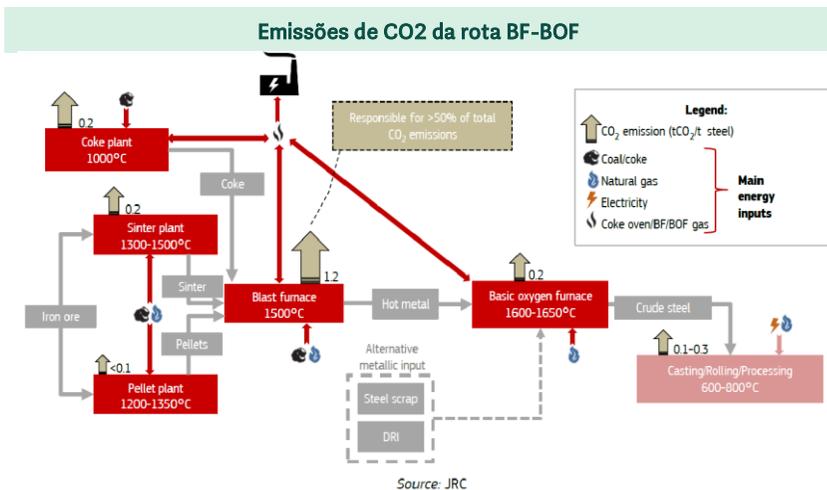


Figura 55: Fonte: Notas de aula, 2023

O carbono não é apenas um insumo energético, mas também necessário para ligar e remover o oxigênio do minério de ferro, resultando em emissões de CO₂ de processo.

Essas emissões de processo representam mais de 50% do total de emissões de CO₂.

Ao olhar para o processo do alto-forno, podemos notar que ele gera uma grande quantidade de CO₂. Esse CO₂ é gerado principalmente pelo elemento redutor utilizado, que é o CO. Na verdade, o CO é responsável por quase metade das emissões de CO₂ no processo. A outra metade das emissões é relacionada à energia. Portanto, mesmo que troquemos a energia por uma fonte renovável, ainda não temos uma solução para a emissão de CO₂ gerada pelo elemento redutor CO.

3.3. Metalurgia primária e secundária

Na indústria siderúrgica, existem dois tipos de processos: a siderurgia primária e a secundária. A siderurgia primária é responsável por transformar o minério em ferro-gusa, que é o produto base para a produção de aço. Já a siderurgia secundária utiliza sucata de aço para produzir aços especiais.

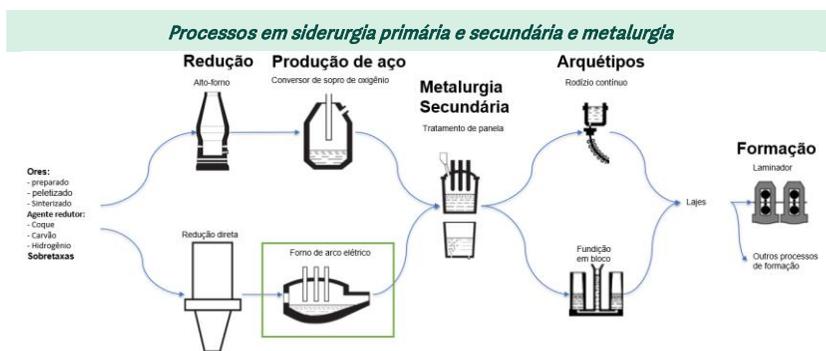


Figura 56: Fonte: Notas de aula, 2023

O problema está relacionado ao processo de conversão em aço, que ocorre após a obtenção do ferro-gusa. Nessa etapa, é preciso remover impurezas e ajustar a composição química do ferro-gusa para produzir diferentes tipos de aço. O uso de sucata de aço na siderurgia secundária é uma forma de reduzir a necessidade de produção de

ferro-gusa, o que pode diminuir as emissões de CO₂ na indústria siderúrgica.

Sucata de metal: Quase 85% dos produtos de ferro e aço são reciclados



Figura 57: Fonte: Notas de aula, 2023

A sucata é composta por aço já produzido, sendo um material bastante diverso em termos de composição. Há sucata com diferentes tipos de liga, com maior ou menor quantidade de carbono, dentre outras variações. Em outras palavras, trata-se de um conjunto heterogêneo de aços em diferentes formas e condições.

Na etapa seguinte, o aço é produzido a partir da sucata, que é basicamente aço já pronto. O processo de transformação da sucata em aço é altamente dependente de eletricidade, como pode ser observado no esquema apresentado. São utilizados eletrodos que fornecem energia e que também são consumidos no processo.

Sucata é fundida em um forno de arco elétrico (EAF) a até 1.800°C com eletrodos trifásicos

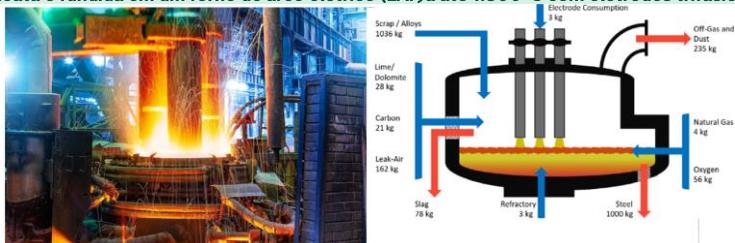


Figura 58: Fonte: Notas de aula, 2023

No entanto, esses eletrodos podem ser alimentados por eletricidade proveniente de fontes renováveis, o que representa uma grande oportunidade para descarbonizar o processo. A fusão da sucata é realizada a altas temperaturas, de cerca de 1800 °C, com adição de oxigênio e outros materiais importantes. Nessa etapa, a energia é mais

importante do que a matéria-prima em si, o que permite a utilização de fontes renováveis de energia para descarbonizar o processo.

Fusão da sucata

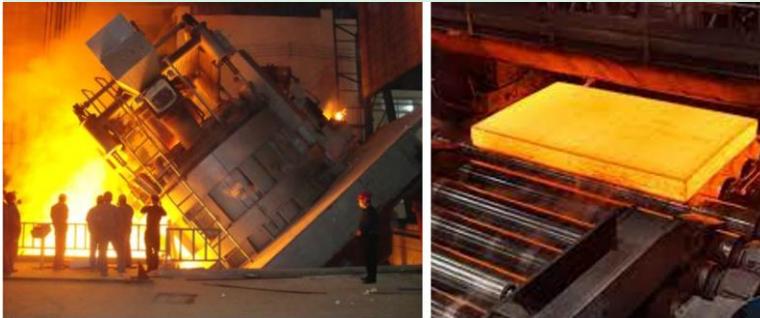


Figura 59: Fonte: Notas de aula, 2023

Os fornos elétricos utilizados na indústria siderúrgica podem ser alimentados por fontes renováveis de energia. Embora haja emissões de CO₂ durante as reações químicas e o consumo de eletrodos de grafite, é possível reduzir parte das emissões através do uso de eletricidade renovável.

Os fornos elétricos a arco (EAF) são quase CO₂ - livres Diagrama de correntes e emissões de CO₂: da rota EAF

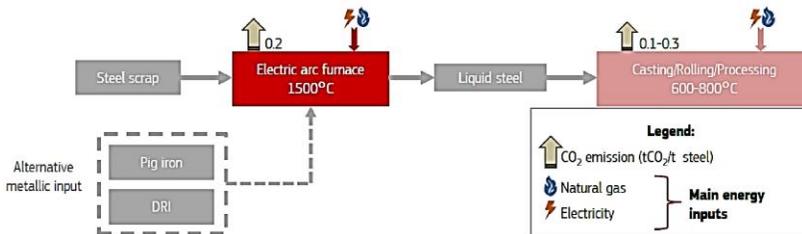


Figura 60: Fonte: Notas de aula, 2023

No entanto, ainda é difícil eliminar completamente as emissões de CO₂, uma vez que o eletrodo é feito de carbono puro. Em 2019, a indústria siderúrgica global emitiu cerca de 3,6 gigatoneladas de CO₂, e a redução das emissões nesse setor é um grande desafio a ser enfrentado.

Na indústria siderúrgica, a maior parte das emissões de CO₂ vem da rota de alto-forno, responsável por produzir o ferro-gusa. A rota de sucata de aço tem emissões menores, mas ainda assim emite CO₂. Para

descarbonizar a produção de aço, é preciso atacar os processos de alto-forno, que são intensivos em emissões de CO₂.

Emissões globais de CO₂ da indústria siderúrgica em 2019

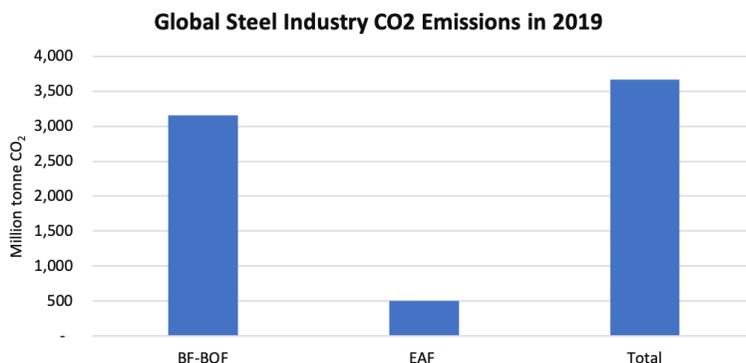


Figura 61: Fonte: Notas de aula, 2023

No entanto, é um desafio descarbonizar essa rota. Uma possível solução é utilizar Hidrogênio Verde como vetor para descarbonizar a produção de aço e produzir aço verde. A rota de sucata de aço já é mais propícia à redução de emissões e pode ser alimentada com energia renovável para reduzir ainda mais as emissões.



Figura 62: Fonte: Notas de aula, 2023

Na indústria do aço, existem duas formas principais de utilizar o hidrogênio como um reagente:

AQUECIMENTO PARA AQUECIMENTO - O hidrogênio pode ser injetado no alto-forno existente para criar calor e remover oxigênio do minério de ferro bruto.

Este uso do hidrogênio, portanto, oferece apenas até 20% de redução nas emissões em comparação com a produção de aço comum.

AGENTE REDUTOR - O hidrogênio também pode ser usado como o principal agente redutor no processo de fabricação do ferro-esponja por redução direta do ferro (DRI) em um forno de cuba.

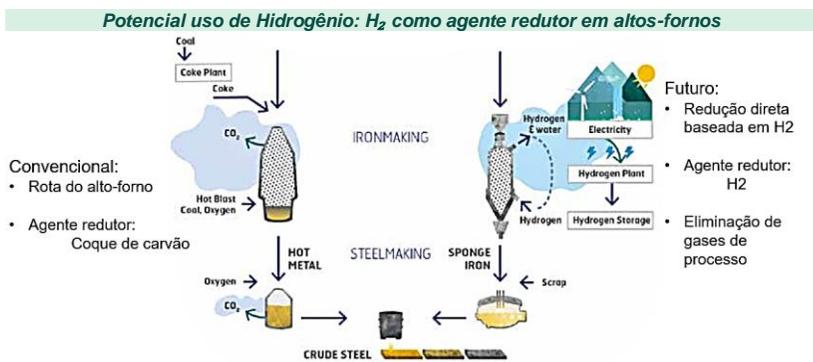
A DRI com hidrogênio pode proporcionar reduções de emissões de CO₂ de até 90-95%.

Aqui vem novamente a importância de entendermos os processos de produção de aço. O hidrogênio pode ser utilizado como meio de aquecimento, uma vez que todo o processo ocorre em altas temperaturas. No entanto, o hidrogênio só contribui com cerca de 20% na redução das emissões de CO₂ e não é na rota do alto-forno.

Para produzir aço com a tecnologia atual, é necessário seguir a rota de redução direta e não a rota do alto-forno. É importante termos essa informação para formarmos uma opinião sobre os processos siderúrgicos.

Se quisermos produzir aço verde, é possível fazê-lo com Hidrogênio Verde na rota da redução direta (DRI). Nessa rota, o Hidrogênio Verde pode ser responsável por até 90%-95% da redução de CO₂ fóssil. Ainda haverá emissão de CO₂, mas será proveniente de outros processos. Ou seja, o Hidrogênio Verde é uma alternativa viável para descarbonizar a produção de aço.

A figura a seguir apresenta duas rotas diferentes da indústria siderúrgica.



A primeira rota é a do alto-forno, que utiliza principalmente coque de carvão como agente redutor. Já a segunda rota é a da redução direta, que utiliza hidrogênio como agente redutor e produz água como subproduto. É possível produzir tanto a eletricidade quanto o hidrogênio de forma renovável, utilizando fontes como a eletrólise ou a reforma de compostos renováveis, como o biogás e o biometano.

A indústria siderúrgica é responsável por uma grande emissão de CO₂, poluente e energívora, o que torna importante o uso do Hidrogênio Verde como vetor de energia e agente redutor de processos, especialmente quando ele vem de fontes renováveis.

O próximo setor a ser abordado é o da indústria química, que é complexo e apresenta várias facetas e tipos de produtos. A introdução do Hidrogênio Verde neste setor pode ser uma forma de apoio energético e de matéria-prima, substituindo a produção de hidrogênio feita normalmente por reforma de metano.

É importante perceber as conexões entre os diferentes setores e processos, mesmo que não sejamos especialistas em química ou processos químicos, pois o uso do Hidrogênio Verde pode se justificar em termos de escala e oferecer diversas oportunidades.

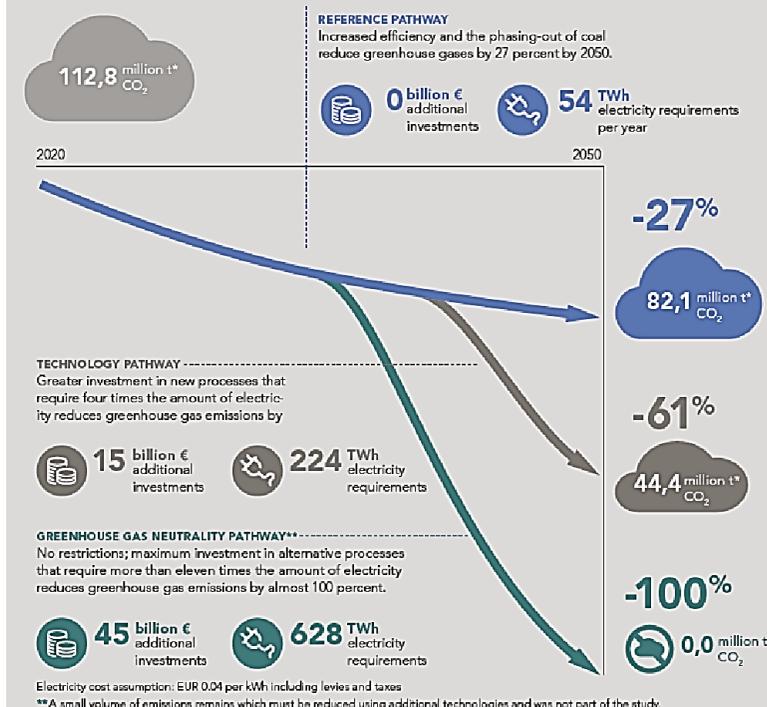
4. Indústria Química e Agronegócio

Na introdução ao Hidrogênio Verde em setores industriais, é importante entender que o setor da energia é responsável por 73% das emissões de gases de efeito estufa no mundo. Dentro desse setor, a indústria é responsável por 30% dessas emissões. Tanto na produção de energia quanto de matéria-prima, a indústria química é intensiva em energia e em emissões, já que a maior parte da energia vem de processos que dependem de combustíveis fósseis.

Na indústria química, existem produtos de diferentes gerações, sendo que os principais são metanol, amônia (que é utilizada na produção de fertilizantes), ureia, etileno, propileno e compostos com cloro. Esses produtos correspondem a 2/3 das emissões de gases de efeito estufa da indústria química. Portanto, é importante focar em reduzir as emissões desses produtos.

Emissões de gases de efeito estufa de processos, necessidades energéticas e produtos

Greenhouse gas emissions from processes, energy requirements and products*



Em resumo:

- Processos de produção + matérias-primas → intensivos em energia e emissões.
- Metanol, amônia, ureia, etileno, propileno e cloro, benzeno, tolueno e xileno → 2/3 emissões de gases de efeito estufa
- Eletrificação → aumento a demanda de eletricidade da indústria química alemã para 685 TWh por ano a partir de meados dos anos 2030.
- Isto é mais do que toda a produção de eletricidade alemã em 2018

Figura 64: Fonte: Notas de aula, 2023

Outra questão relevante é a eletrificação dos processos industriais, que pode ser feita com a energia solar e eólica, reduzindo as emissões de carbono fóssil. A eletrificação será responsável por um aumento de demanda de energia elétrica, o que pode levar à necessidade de criar uma nova Alemanha elétrica só para a indústria química. É importante lembrar que a eletrificação afetará também outros setores e demandará uma grande quantidade de energia.

Nesse contexto, o Hidrogênio Verde pode ser uma solução importante para reduzir as emissões da indústria química. A produção de hidrogênio pode ser feita por meio de fontes renováveis, como eletrólise ou reforma de biogás ou biometano. Além disso, o hidrogênio pode ser utilizado como meio de aquecimento e agente redutor nos processos de produção. A redução direta com Hidrogênio Verde pode ser responsável por até 90%-95% da redução de CO₂ fóssil na produção de aço, por exemplo.

Em resumo, é importante atacar as emissões dos principais produtos da indústria química e considerar o Hidrogênio Verde uma alternativa para reduzir as emissões e aumentar a eficiência energética da indústria.

A indústria química é um setor muito importante e tradicional na Alemanha, juntamente à indústria farmacêutica, representando 10% da movimentação financeira do mundo industrial alemão e empregando cerca de 500 mil trabalhadores.

Essa indústria possui uma cadeia de produtos que começa com a extração do petróleo bruto, passando pela produção de nafta, propileno, polipropileno, aditivos e chega até os plásticos. Cada ponto dessa cadeia é considerado uma geração dentro da indústria química.

Essa indústria é responsável pela produção de diversos produtos, desde polímeros e produtos petroquímicos até produtos químicos orgânicos básicos e finos, além de itens que usamos em nossa casa, como detergentes.

A abrangência e capilaridade da indústria química é gigantesca em qualquer país, movimentando muito dinheiro e empregando muita gente, tanto diretamente quanto indiretamente.

Emissões de dois lados

Emissões de dois lados:

- Os materiais da linha: Necessidade de ser substituído por materiais de linha de base renovável (à base de hidrogênio)
- Eletricidade e calor: Necessidade de ser substituído por fontes renováveis

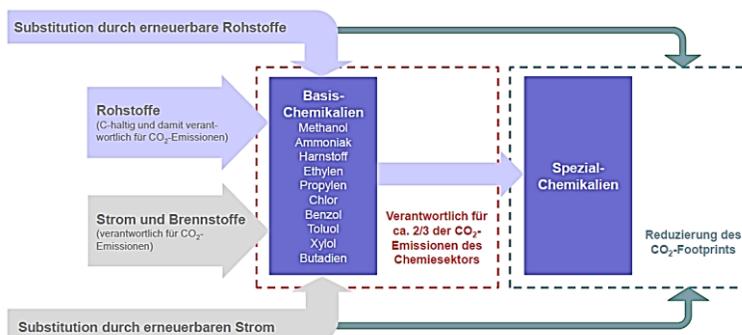


Figura 65: Fonte: Fonte: Görner, K., *Energiewende Industrie*, 2021

Aqui vamos falar sobre a importância do hidrogênio como matéria-prima na indústria química e sua diferença em relação a outros setores que utilizam o hidrogênio para produção de energia.

Na indústria química, é fundamental o uso de energia e de hidrogênio como matéria-prima, o que a torna diferente de outros setores, como o de transporte ou de geração de energia, em que o hidrogênio é utilizado para produção de energia, visando a redução dos gases de efeito estufa, quando produzido a partir de fontes renováveis.

Nesse sentido, é importante destacar que o hidrogênio na indústria química entra como um material, sendo utilizado como matéria-prima em diversas etapas da produção, como na fabricação de polímeros, petroquímicos e químicos orgânicos, por exemplo.

Dessa forma, é necessário compreender a importância do Hidrogênio Verde como uma alternativa mais sustentável, produzido a partir de fontes renováveis, na redução das emissões de gases de efeito estufa na indústria química, assim como em outros setores que também utilizam o hidrogênio como matéria-prima.

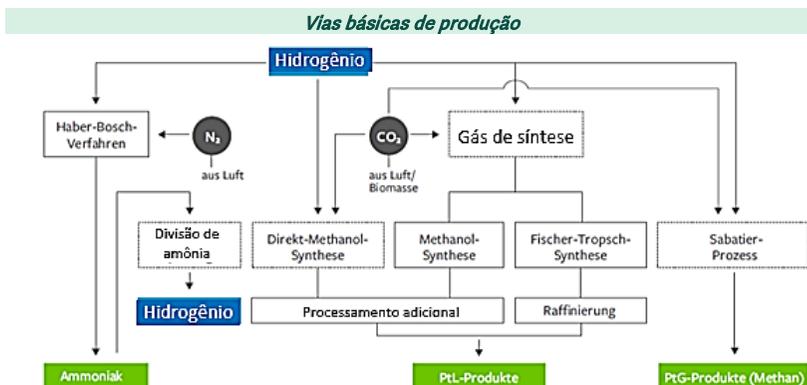


Figura 66: Fonte: SRU, Declaração sobre Hidrogênio na Proteção Climática, 2021

Vamos falar um pouco sobre as produções da indústria química. O PTA se assemelha ao produto PTX que estamos discutindo neste capítulo. Quando se trabalha com nitrogênio e não se tem CO_2 disponível, junto ao hidrogênio é possível produzir gás de síntese e, através de outros processamentos, chegar aos produtos mostrados na linha verde.

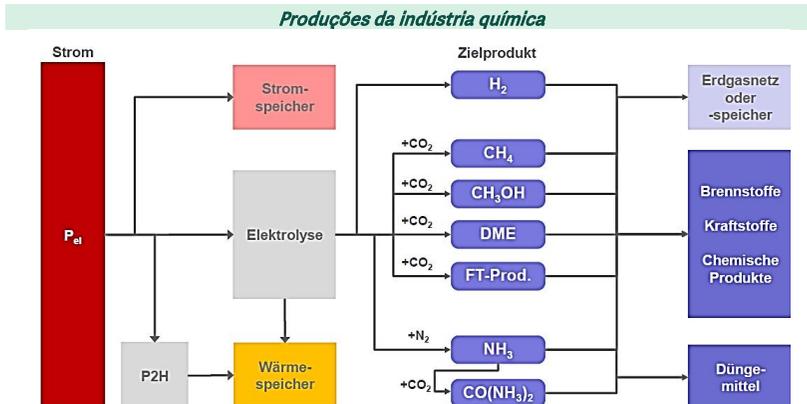


Figura 67: Fonte: Görner, K., Energiewende Industrie, 2021

‘No campo da produção de energia, a indústria química tem um papel importante no uso de hidrogênio como matéria-prima. A substituição de combustíveis fósseis por hidrogênio na produção de produtos químicos pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa.

No entanto, há desafios na implementação dessa mudança. Grandes indústrias químicas possuem instalações de capital intensivo, que podem ser difíceis de modificar para utilizar hidrogênio. Além disso, a transição para o uso de hidrogênio exigirá um aumento significativo na demanda de eletricidade, o que pode ser difícil de suprir.

A introdução de novas tecnologias, como a eletrificação, pode tornar possível atingir a meta de neutralidade de carbono em 2050. No entanto, essa transição exigirá uma mudança de hábitos e tolerância a essas mudanças.

O Brasil tem uma oportunidade única de fornecer hidrogênio para a Europa e a Alemanha. No entanto, se o país também quiser neutralizar as emissões de sua própria indústria química, precisará de combustíveis renováveis.

A troca de hábitos pode ser um fator decisivo para a implementação de novas tecnologias, especialmente em relação à vida de cada um. A efetividade das ações na indústria química é muito maior do que em outros setores, devido à sua grande dispersão e ao fato de que não envolve diretamente pessoas.

Ao abordar o tema da indústria, é importante pensar no todo e considerar dados fortes que podem alertar para a necessidade de aumentar a oferta de eletricidade. Isso se aplica especialmente à indústria química, que, sozinha, exigiria a duplicação do parque de oferta de eletricidade de um país industrializado, como a Alemanha. É importante lembrar que essa necessidade se soma a outros setores que também demandam grande quantidade de eletricidade, e que mesmo a oferta atual já é um desafio.

O plano de neutralidade de carbono para 2050 é uma previsão baseada em dados incertos. À medida que a incerteza aumenta, a previsão pode se tornar uma projeção ou um cenário, tornando a previsão do futuro cada vez mais difícil.

No Brasil, é preciso considerar a questão da intermitência da energia solar e eólica, que está se tornando cada vez mais relevante. Na Alemanha, essa preocupação já existe há mais de 10 anos, principalmente em relação à intermitência da energia eólica.

A complementaridade com a geração térmica, como a geração de gás natural, carvão e até mesmo nuclear, é uma solução. No Brasil, a complementaridade com a geração hidrelétrica é uma alternativa viável, uma vez que é possível fazer armazenamento de água nos reservatórios.

O Hidrogênio Verde pode contribuir para o armazenamento de energia e, conseqüentemente, para a redução das emissões de carbono. No entanto, é importante questionar se as iniciativas nesse sentido são motivadas pela preocupação ambiental ou se buscam apenas oportunidades de negócio. A Petrobras, por exemplo, pode estar perdendo oportunidades de investimento em Hidrogênio Verde ao focar apenas no pré-sal.

É necessário considerar novos modelos de negócio que possam agregar conhecimento e valor para a indústria, em vez de se limitar a commodities. O Hidrogênio Verde pode ser uma dessas oportunidades, desde que sejam considerados os desafios técnicos e ambientais envolvidos em sua produção e armazenamento.

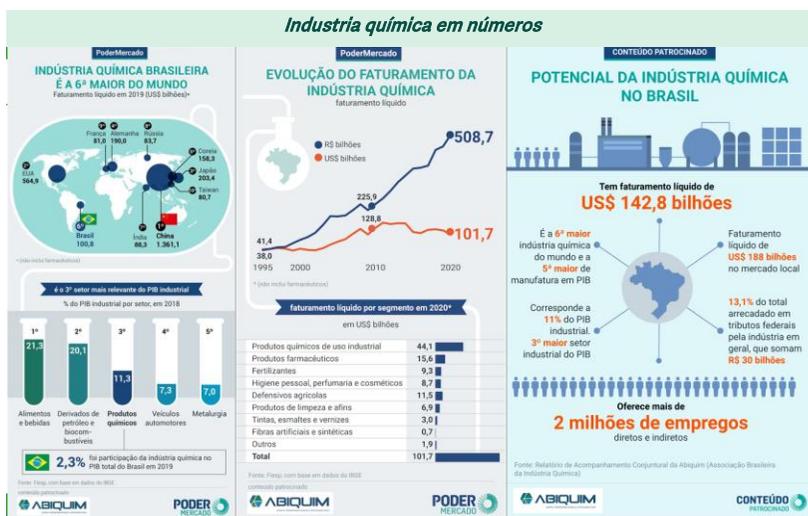


Figura 68: Fonte: Abiquim, PoderMercado

A indústria química brasileira é muito importante com uma posição de destaque no cenário global, ocupando o sexto lugar entre os maiores produtores do mundo. Essa indústria é semelhante à indústria

siderúrgica em termos de importância, e o Brasil é o nono maior produtor de aço do mundo. A indústria química emprega muitas pessoas e movimenta uma grande quantidade de dinheiro, sendo o terceiro setor mais relevante do PIB brasileiro. Além disso, a indústria química está intimamente ligada à indústria farmacêutica. Tudo isso se deve às condições favoráveis do Brasil, como mão de obra qualificada, disponibilidade de energia e matéria-prima.

Indústria química mundial: principais países

Indústria química mundial – principais países



Fontes: ACC, CEFIC e Abiquim.

Figura 69: Fonte: ACC, CEFIC e Abiquim

A indústria química brasileira é um setor muito forte e importante para a economia nacional. Ela ocupa a sexta posição no ranking mundial em faturamento e é o terceiro setor mais relevante para o PIB do país. É uma indústria que envolve mão de obra qualificada, disponibilidade de energia e matéria-prima. Vale ressaltar que essa indústria inclui também o setor farmacêutico.

Comparando com outros países, a China lidera o ranking em faturamento, seguida pelos Estados Unidos e depois pelos países europeus, como Alemanha, França, Itália e Holanda. O faturamento líquido da indústria química brasileira é gigantesco, ficando entre os países europeus e os Estados Unidos.

Investimentos realizados e programados

INVESTIMENTOS REALIZADOS E PROGRAMADOS (EM US\$ BILHÕES) 1995 A 2022



Figura 70: Fonte: Abiquim

A indústria química é uma indústria em constante crescimento e os investimentos programados são sempre muito grandes. Se incluirmos a indústria farmacêutica, que é uma indústria mais avançada, com processos de geração de produtos mais complexos, ela é caracterizada por investimentos em pesquisa e desenvolvimento muito fortes.

É importante ressaltar que a indústria farmacêutica apresenta uma relação de sucesso baixa, ou seja, para cada fármaco que é desenvolvido e dá certo, existem em média 100 que não tiveram sucesso. Isso mostra a importância da pesquisa e desenvolvimento constante nessa indústria.

Evolução da balança comercial de produtos químicos

EVOLUÇÃO DA BALANÇA COMERCIAL DE PRODUTOS QUÍMICOS (US\$ BILHÕES FOB) 1991 A 2018*



Figura 71: Fonte: Abiquim

A indústria química e farmacêutica está em constante evolução, o que é algo bastante natural e esperado. Esses dois setores são frequentemente associados, devido às semelhanças em suas produções e processos. A química é responsável pela fabricação de produtos químicos, enquanto a farmacêutica desenvolve medicamentos e produtos para a saúde. Ambas as áreas possuem grande importância na economia mundial e estão em constante crescimento.

No Brasil, temos algumas das maiores empresas da indústria química do mundo. Em 2018, a Braskem era a maior companhia química do país e a décima nona maior do mundo.

As 20 principais empresas de indústria química mundial em 2018

Tabela 3 – As 20 principais empresas de indústria química mundial em 2018

Ordem	Empresa	País sede	Vendas US\$ bi	Lucro operacional US\$ mi	Investimento em capital US\$ mi	P&D US\$ mi
1	DowDuPont	EUA	86,0	8.412	3.837	3.060
2	BASF	Alemanha	74,1	7.462	4.602	2.397
3	Sinopec	China	69,2	3.929	2.962	n.d.
4	SABIC	Arábia Saudita	42,1	9.518	3.866	n.d.
5	Ineos	Reino Unido	37,0	4.289	n.d.	n.d.
6	Formosa Plastics	Taiwan	36,9	4.022	n.d.	n.d.
7	Exxon Mobil	EUA	32,4	4.162	1.404	n.d.
8	LyondellBasell	Holanda	30,8	5.615	1.846	115
9	Mitsubishi Chemicals	Japão	28,7	2.382	1.883	n.d.
10	LG Chem	Coreia do Sul	25,6	2.043	3.838	917
11	Reliance Industries	Índia	25,2	4.706	n.d.	n.d.
12	Petrochina	China	24,8	1.184	n.d.	n.d.
13	Air Liquide	França	24,3	2.379	2.605	355
14	Toray Industries	Japão	18,7	1.378	n.d.	n.d.
15	Evonik Industries	Alemanha	17,8	2.078	1.220	542
16	Covestro	Alemanha	17,3	2.982	835	326
17	Bayer	Alemanha	16,9	3.708	1.217	2.304
18	Sumitomo Chemical	Japão	13,8	1.182	1.171	n.d.
19	Braskem	Brasil	15,9	2.250	741	55
20	Lotte Chemical	Coreia do Sul	15,1	1.790	1.680	84

Fonte: C&EN – Chemical and Engineering News; July 29, 2019; “c&en’s Global Top 50”, p. 33 e 35

Figura 72: Fonte: C&EN - Chemical and Engineering News, July 29, 2019, “C&en’s Global Top 50”, p 33 e 35

Vale ressaltar que a empresa tem seu capital social 100% nacional, o que nos leva a uma discussão sobre a presença de capital externo no setor químico brasileiro, já que o país é o sexto maior produtor do mundo nessa área.

Na indústria química, o faturamento líquido das empresas é proveniente principalmente da venda de matéria-prima de base, que representa 55% desse faturamento. Outro produto importante é o fertilizante. Mas para onde esse dinheiro vai? Essa é uma questão importante a ser considerada.

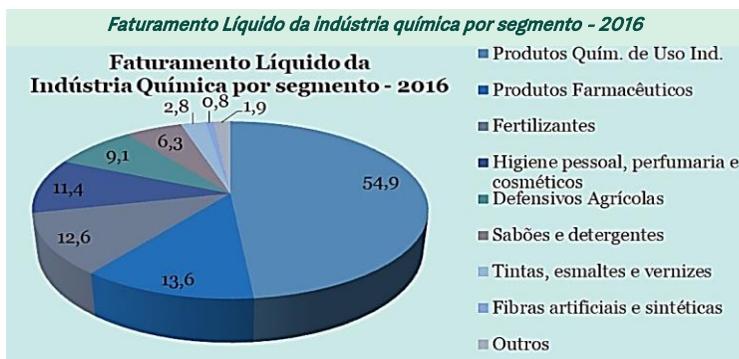


Figura 73: Fonte: Notas de aula, 2023

A indústria química é responsável por um faturamento líquido significativo e possui uma ampla variedade de produtos derivados e matérias-primas de base. É importante notar que nenhum setor é muito mais forte do que outro, o que significa que a indústria química pode afetar diferentes setores da sociedade caso falhe. Por isso, é uma indústria em franca evolução, que continua a crescer e se desenvolver.



Figura 74: Fonte: Notas de aula, 2023

A seguir, apresentamos o piso industrial do Brasil por setor, ou seja, a contribuição de cada setor para o PIB industrial.



Figura 75: Fonte: Notas de aula, 2023

O terceiro lugar é ocupado pela indústria química, ficando atrás apenas dos setores de alimentos e energia. A energia aqui se refere principalmente ao petróleo e aos biocombustíveis.

Além disso, a indústria química é mais importante que a automotiva, que é gigantesca, e fica na sequência a metalurgia. É interessante notar que a indústria do fumo ainda representa uma fatia significativa do PIB industrial brasileiro.

Esses dados mostram como a indústria química é um setor fundamental para a economia brasileira e como sua falha pode afetar diferentes áreas da sociedade e do mundo industrial.

Para entendermos a introdução do hidrogênio na indústria química, é importante destacar a relevância do cloro nessa área. O cloro é um elemento antigo e conhecido por sua capacidade de desinfetar e solubilizar substâncias. Ele também é utilizado na produção de compostos químicos que possuem cloro em sua composição.

Anos relevantes da produção e utilização de cloro como produto

- ✓ **1789:** Utilização em indústrias têxteis;
- ✓ **1823:** Desinfecção de hospitais;
- ✓ **1916:** Primeira Guerra: Gás cloro (Cl_2)
- ✓ **1920:** Produção de solventes cloreto de vinila etc. (primeiro momento de relevância industrial);
- ✓ **1939~1945:** Primeira Guerra: bis(2cloroetil) sulfeto (Gás mostarda)



Figura 76: Fonte: Notas de aula, 2023

O cloro é um importante insumo na produção de uma série de produtos químicos, desde detergentes e água sanitária até medicamentos e produtos agrícolas. Ele também já foi utilizado como arma química em guerras no passado.

A introdução do hidrogênio na indústria química pode trazer benefícios ambientais e econômicos significativos, especialmente na produção de compostos que utilizam o cloro. O Hidrogênio Verde, produzido a partir de fontes renováveis de energia, pode substituir o hidrogênio atualmente produzido a partir de fontes fósseis na produção de cloro e seus derivados. Isso reduziria as emissões de gases de efeito estufa e tornaria a produção desses compostos mais sustentável e econômica.

4.1. Indústria de Cloro e Álcalis:

A eletrólise de cloro e álcalis está no início de importantes cadeias de valor químico. Ela produz seu principal produto, cloro, a partir de sal-gema e água em combinação com hidrogênio e soda cáustica. A eletrólise de cloro e álcalis é o processo mais intensivo em eletricidade na indústria química.

A indústria química alemã utiliza uma grande quantidade de eletricidade, e uma parte significativa desse consumo é destinada à produção de cloro e álcalis por meio da eletrólise, que é um processo que utiliza hidrogênio.

Na Alemanha, esse processo representa cerca de 1,5% do consumo geral de eletricidade do país, o que pode parecer pouco, mas é

significativo quando se considera que se trata de um setor específico que impacta diretamente grandes consumidores de eletricidade em um país altamente industrializado como a Alemanha. O hidrogênio é uma peça-chave nessa cadeia de valor da indústria química, e sua utilização na eletrólise é um exemplo de como essa molécula pode ser importante para a produção de compostos químicos.

Modelo de Negócios de Química do Cloro – Segmentos de Negócios:

- O cloro fundamental na indústria química.
- Utilização para, entre outras coisas:
- Plásticos;
- Corantes;
- Farmacêuticos.
- Cloreto de polivinila (PVC) como a linha de produção mais importante.

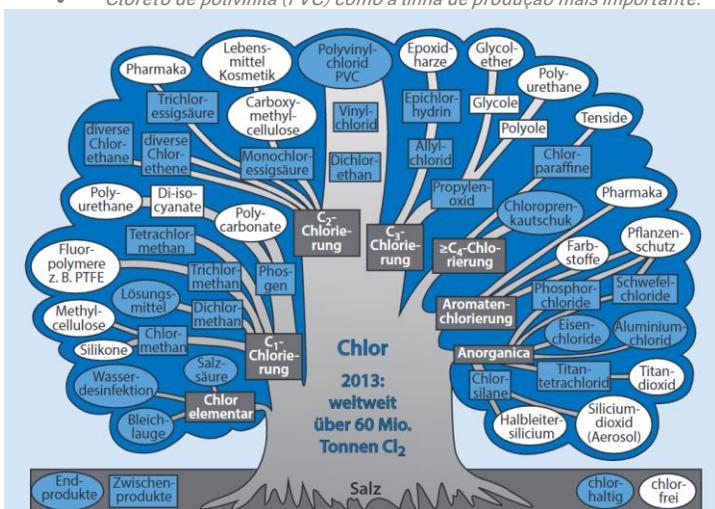


Figura 77: Fonte: Einführung in die Technische Chemie 2. Auflage, Arno Behr et al., 2016

No ramo da indústria química, o cloro é um elemento amplamente utilizado na produção de diversos produtos, como fármacos, plásticos, corantes, entre outros. O tubo de PVC é um exemplo clássico, onde o "C" significa cloro.

Além disso, o cloro é usado em diferentes produtos de limpeza, como desinfetantes, que usamos em nossas casas diariamente. É importante perceber a extensão da importância desse componente na indústria química. Embora não seja possível abordar todos os produtos em que

o cloro é usado, podemos ter uma ideia visual da variedade de produtos que contêm esse elemento.

Produtos a jusante da química alemã do cloro		
Produto	Parte [%]	Utilização em ...
Cloreto de polivinila (PVC)	35	Móveis, pisos, folhas, cabos
Isocianatos e oxigenatos	27	Lacas, adesivos, endurecedores
Compostos inorgânicos	14	Ácido clorídrico, cal
Chloromethanes	6	Silicones, ligantes, shampoo
Epicloridrina	6	Resinas epoxídicas
Diclorometano	3	Solvente
Outros	9	

Figura 78: Fonte: Duden Learnattack GmbH: Verwendung von Chlor und Natronlauge, 2022

O PVC é um material muito utilizado atualmente em diversos produtos, como janelas e aberturas. Além disso, diversos compostos químicos que contêm cloro, como os mencionados na lista, são amplamente reconhecidos e utilizados em diversas aplicações, desde tintas e adesivos até substâncias de limpeza, silicone e até mesmo xampu. Isso mostra a grande importância desse componente na indústria química e em nossa vida cotidiana.

Na indústria química, o cloro é um elemento importante na produção de diversos produtos, desde fármacos até PVC. Para obter o cloro, é necessário passar por um processo de eletrólise que separa o cloro do sódio, que é obtido a partir da mineração de sal. A eletrólise é o processo mais comum e convencional, sendo o processo de membrana o mais difundido, principalmente na Alemanha.

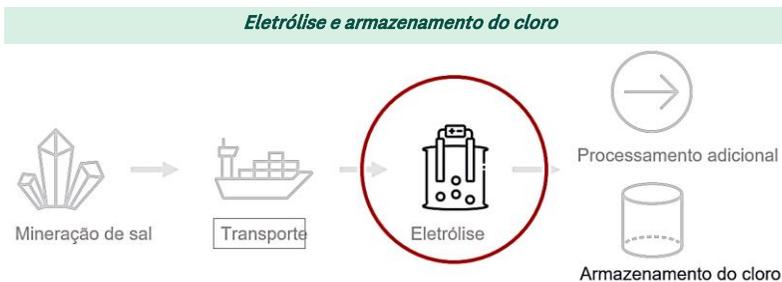
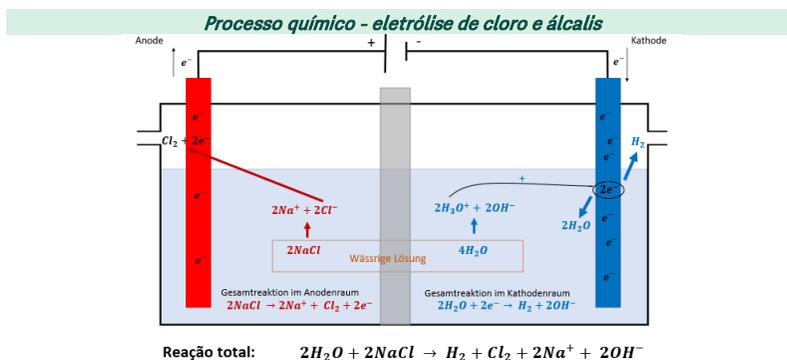


Figura 79: Fonte: Kurzweiler: Angewandte Elektrochemie, 2020

Existem outros processos, como o de diafragma e de amálgama, porém são menos difundidos devido à sua menor confiabilidade e maior custo energético.

O processo de eletrólise consiste em separar os elementos químicos utilizando eletricidade. Na produção de cloro, o sal é dissolvido em água e é aplicada uma corrente elétrica, que separa o cloro do sódio. Após isso, o cloro é utilizado na produção de diversos produtos químicos, como PVC, corantes, adesivos, tintas, entre outros.

É importante ressaltar que a eletrólise consome uma grande quantidade de energia, sendo um fator limitante para a produção de cloro. Porém, com a introdução do Hidrogênio Verde na indústria química, é possível utilizar energia renovável para a produção de eletricidade, reduzindo o impacto ambiental do processo e tornando-o mais sustentável.



Atualmente, existem três processos de produção principais:

- Processo de membrana é o processo mais utilizado na Alemanha. Cerca de um terço das fábricas são utilizadas como primeira etapa do processo na produção de PVC.

O processo de membrana tem um baixo consumo de eletricidade por tonelada de cloro produzido. Um desenvolvimento adicional do processo de membrana através de um cátodo despolarizado de oxigênio (ODC)

O ODC reduz consideravelmente a necessidade de energia elétrica, mas em troca não produz mais hidrogênio.

- Processo de diafragma é usado apenas em dois locais na Alemanha, com uma capacidade total de produção de 1110 kt Cl₂.

O processo do diafragma também é caracterizado por uma baixa demanda específica de eletricidade.

- Procedimento clássico de amálgama tem um consumo de energia muito alto e não é mais utilizado na Europa desde o final de 2017.

Figura 80: Fonte: Kurzweiler: Angewandte Elektrochemie, 2020

O processo de membrana é o mais difundido e empregado na indústria química para a separação do Na (sódio) e do Cl (cloro) por meio da eletrólise. Nele, os íons são separados por uma membrana que impede a passagem de substâncias que devem ser separadas. É como um diodo, que permite a passagem de corrente elétrica em apenas uma direção.

O processo de Membrana

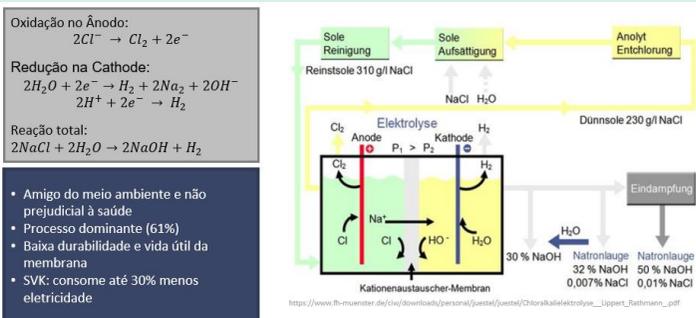


Figura 81: Fonte: https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Chloralkalielektrolyse__Lippert_Rathmann_.pdf

Esse processo oferece menos riscos e é mais dominante em comparação com o processo de diafragma, que é uma variação do processo de membrana e utiliza um tipo diferente de membrana para separar os íons.

O processo de Diafragma

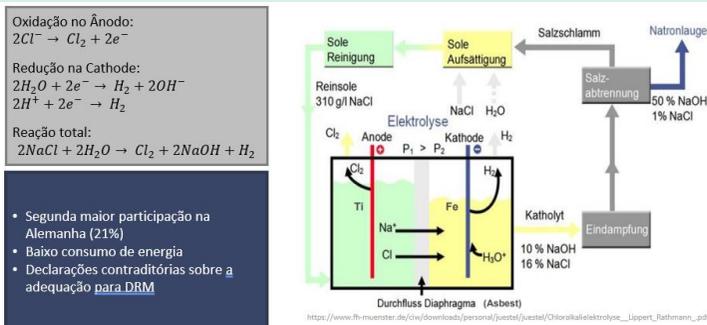


Figura 82: Fonte: https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Chloralkalielektrolyse__Lippert_Rathmann_.pdf

Ambos os processos envolvem a criação de campos elétricos para atrair os íons para um lado e outro do banho eletrolítico.

O processo de amálgama é pouco utilizado atualmente e foi descontinuado em alguns lugares.

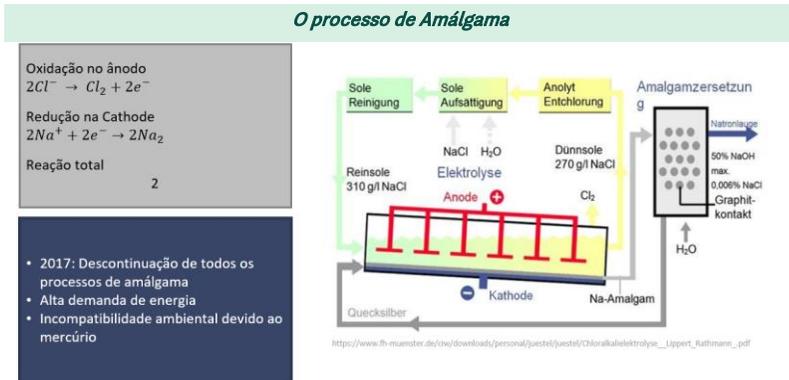


Figura 83: Fonte: https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Chloralkalielektrolyse__Lippert_Rathmann_.pdf

Ao analisar a demanda específica de energia elétrica por unidade eletroquímica, podemos observar que o processo de amálgama é o que mais demanda energia, apresentado na cor amarela. Em seguida, temos o processo de membrana, apresentado na cor azul, que possui diversas variações. Por fim, o processo de diafragma, apresentado na cor vermelha.

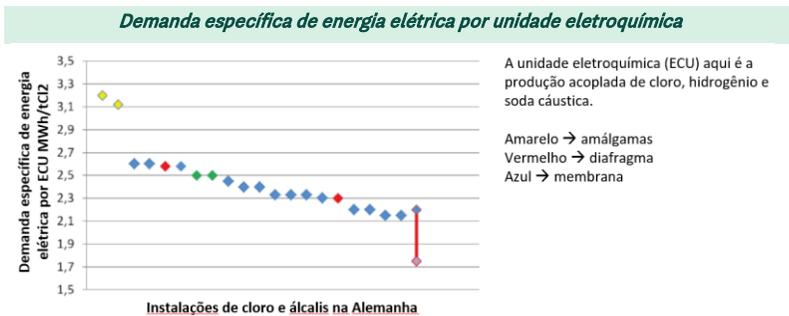


Figura 84: Fonte: Notas de aula, 2023

Apesar das diferentes variações do processo de membrana, ele é o mais comum entre os processos de produção de cloro por eletrólise.

Todos esses processos têm em comum a necessidade de eletricidade para a separação e dissociação do sal (NaCl).

O processo de eletrólise do cloro é um processo eletrificado que demanda energia para sua realização. A tecnologia sem emissão de CO₂ pode estar relacionada à origem dessa eletricidade, que depende da matriz energética utilizada. Por exemplo, nos Estados Unidos, que têm uma matriz elétrica com 20% de renováveis e 80% de combustíveis fósseis, a produção de cloro pode gerar mais emissões de CO₂ do que no Brasil, que tem uma matriz elétrica com maior participação de fontes renováveis.

Um subproduto interessante desse processo de eletrólise é a produção de hidrogênio, que pode ser verde se for obtido a partir de fontes renováveis. Esse hidrogênio pode ser utilizado para diversas finalidades, incluindo a indústria química. No entanto, é importante destacar que a produção de hidrogênio a partir do processo de eletrólise do cloro não é suficiente para atender às necessidades da indústria química.

O hidrogênio é um material básico central para a produção de petroquímicos, como vimos anteriormente. Na indústria química, o hidrogênio é utilizado na síntese de amônia e metanol. Porém, a produção de hidrogênio a partir da eletrólise do cloro não é suficiente para suprir a demanda da indústria química. Para isso, é necessário obter hidrogênio a partir de outras fontes, como a reforma a vapor de gás natural.

Em resumo, a eletrólise do cloro pode ser uma fonte interessante de Hidrogênio Verde, mas não é suficiente para atender às necessidades da indústria química. Para isso, é necessário obter hidrogênio de outras fontes, o que ainda é uma limitação para a transição da indústria química para uma economia de baixo carbono.

4.2. Síntese de amônia:

A síntese de amônia é um dos maiores processos petroquímicos em termos de volume. Na Alemanha, foram produzidas 3,13 milhões de

toneladas de amoníaco em 2017. Síntese de amônia é um processo fundamental, um dos maiores processos que a gente tem.

A síntese convencional de amônia é baseada na reação de hidrogênio proveniente da reforma a vapor do gás natural com nitrogênio sobre um catalisador de ferro a 150-350 bar e 450-550 °C.

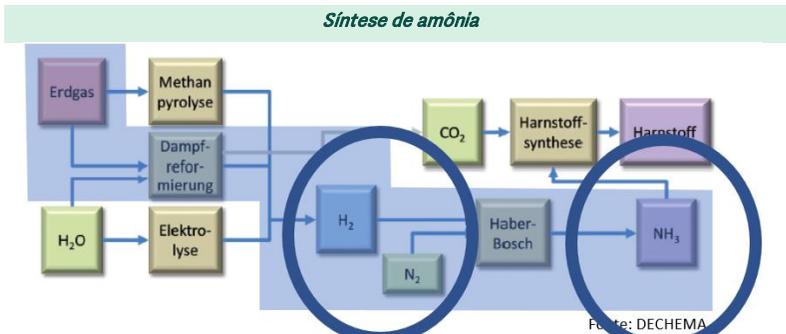


Figura 85: Fonte: DECHEMA

Para produzir amônia (NH_3), que é uma substância muito importante na indústria química, é necessário ter hidrogênio e nitrogênio. O nitrogênio é abundante na atmosfera, representando cerca de 79% da sua composição. Já o hidrogênio é geralmente obtido a partir da reforma do metano, um processo que utiliza combustíveis fósseis e gera emissões de CO_2 .

No entanto, existem alternativas mais sustentáveis, como a produção de Hidrogênio Verde por eletrólise, que utiliza fontes renováveis de energia. Outra opção interessante é a reforma do metano do biogás e do biometano, que são fontes orgânicas e renováveis de combustível.

A síntese da amônia é um processo que envolve a obtenção de hidrogênio e nitrogênio para reagir e formar o composto químico NH_3 . Uma das formas de obter hidrogênio é por meio da eletrólise da água, porém, este é um processo caro, custando mais de U\$5,00/kg, enquanto a reforma do metano gera hidrogênio por um custo de U\$1,00 a U\$1,50/kg.

Outra alternativa é a pirólise do metano, que é uma forma de obtenção de hidrogênio por meio da quebra do gás metano, mas que ainda é uma tecnologia em desenvolvimento.

A síntese da amônia

- Os processos alternativos, de baixa emissão, são baseados no fornecimento de hidrogênio por eletrólise da água ou **pirólise do metano**.
- Emissões relacionadas à energia
- CO₂ do metano.

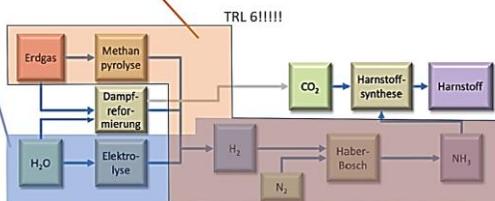


Figura 86: Fonte: DECHEMA

Para obter nitrogênio, é necessário ter uma unidade de separação de ar, que é uma instalação complexa e consome muita energia. As unidades de separação de ar geralmente são utilizadas em instalações químicas-industriais, pois são capazes de aproveitar os diferentes componentes do ar, como o oxigênio, o nitrogênio e o argônio. Por isso, para ser viável financeiramente, é necessário que a unidade de separação de ar seja capaz de lidar com pelo menos esses três componentes.

O processo é complexo porque entra nos diagramas de fase, de misturas e o assunto se complica. Quando você pensa em uma substância pura, como a água, você tem uma troca de fase bem definida. Porém, quando se trata de uma mistura, a troca de fase vai depender do conteúdo das outras substâncias presentes.

É nesse ponto que entram os diagramas de fase. É importante lembrar que quanto mais substâncias estiverem presentes, mais complexo será o processo de separação na unidade de separação de ar.

Na produção de nitrogênio, utiliza-se o ar como matéria-prima, que é gratuito e disponível em abundância na atmosfera. No entanto, é necessário realizar uma limpeza com filtro e compressão do ar, que aumenta sua temperatura. Em seguida, é necessário resfriá-lo por expansão, de forma a separar as diferentes fases presentes no ar.

Separação de ar: criogenia

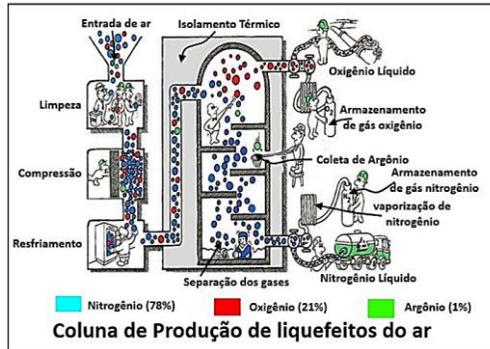
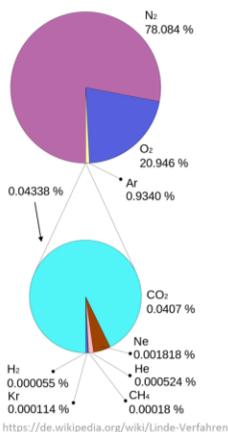


Figura 87: Fonte: Notas de aula, 2023

O primeiro componente separado é o oxigênio, seguido pelo argônio e, por fim, o nitrogênio. Embora pareça um processo simples, na prática é bastante complexo e envolve a utilização de unidades especializadas, baseadas em ciclos de turbina a gás invertido.

O ar comprimido passa por um compressor e, em seguida, é resfriado à pressão constante, trocando calor com o ar externo. Depois, é expandido, o que faz com que esfrie ainda mais. Repetindo esse processo de resfriamento sucessivamente, é possível liquefazer o nitrogênio, já que a troca de fase ocorre em temperaturas e pressões diferentes para cada uma das espécies que compõem o ar.



Os componentes são necessários em várias indústrias:

Nitrogênio

- Indústria alimentícia (gás protetor)
- Indústria química (proteção contra incêndios)
- Indústria de transporte (refrigeração)
- Aeroespacial (inflagem dos pneus)

Oxigênio

- Processos de combustão industrial, oxidação e aquecimento
- Medicina
- Aeroespacial

Argônio

- Tecnologia de soldagem
- Sistemas de extinção de incêndio
- Indústria alimentícia (gás protetor)

Gases Nobres

- Gases luminosos (parcialmente coloridos)
- Líquido refrigerante
- Medicina

Produção na Alemanha 2020

- Oxigênio: 5.562 milhões de m³
- Nitrogênio: 6.558 milhões de m³

... a produção de amoníaco "neutro" chegando em breve

Figura 88: Componentes necessários em indústrias

Na indústria química, o ar é uma das principais matérias-primas utilizadas na produção de diversos produtos, como gases e líquidos. O ar é composto principalmente por nitrogênio (79%) e oxigênio (aproximadamente 21%), além de outros compostos como argônio, hidrogênio e CO₂. O argônio é utilizado em processos como soldagem, extinção de incêndios e em aplicações na indústria alimentícia.

Para separar os componentes do ar, é utilizada uma indústria gigante chamada de unidade de separação de ar. Nessa unidade, é possível produzir basicamente oxigênio e nitrogênio, tanto em estado comprimido quanto não comprimido. A separação de ar é um processo complexo que envolve a compressão e expansão do ar em ciclos de turbina a gás invertido, gerando resfriamento e liquefação dos componentes em temperaturas e pressões específicas.

Amônia por eletrólise de Hidrogênio: Custo de produção previsto e emissões de CO₂:

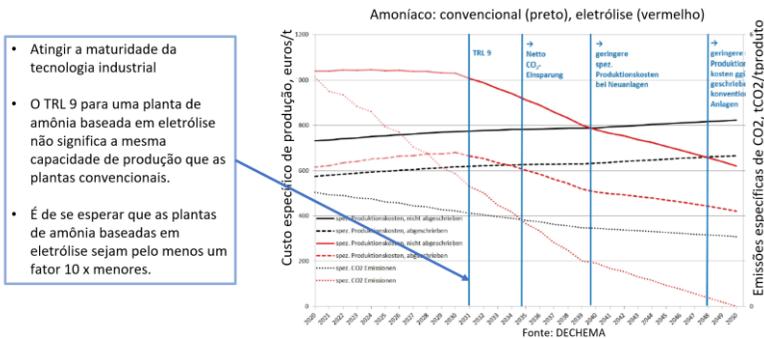


Figura 89: Custos e emissões de produção de amônia

É importante ressaltar que a produção de amônia por meio de eletrólise é diferente daquela baseada no gás de reforma de gás natural. Embora essa tecnologia já seja comercialmente viável e reduza significativamente as emissões de carbono, o seu custo específico ainda é muito elevado em comparação com a produção baseada em reforma de metano. É preciso lembrar que a redução das emissões é importante, mas também é necessário considerar a viabilidade econômica da produção de Hidrogênio Verde e seus derivados.

4.3. Síntese de Ureia:

A ureia pura é um sólido branco, cristalino, inodoro, não tóxico e higienicamente seguro que se dissolve bem na água.

Com um volume de produção de cerca de 200 milhões de toneladas por ano, é uma das substâncias químicas mais amplamente produzidas.

A ureia é um fertilizante de nitrogênio muito utilizado e material de partida para a indústria química, por exemplo, para a produção de resinas de ureia, utilizadas como adesivos, para impregnação ou isolamento. A ureia também serve como base para a síntese de melamina, ácido barbitúrico, cafeína, hidrazina, AdBlue e outros produtos químicos.

A partir do processo de síntese de amônia, é possível obter a ureia, que é um sólido utilizado como fertilizante e matéria-prima na indústria química. Além disso, a ureia também pode ser utilizada na captura de Nox (óxidos de nitrogênio) gerados na combustão de motores diesel. Por isso, é comum encontrá-la em sistemas de captura de Nox. Com isso, a ureia tem diversas aplicações e é uma importante substância para a indústria química e agrícola.

A ureia é produzida na Alemanha em uma quantidade de 520 kt/a.

O uso de CO₂ de processos químicos ou outras fontes industriais representa uma reciclagem de CO₂ que evita o uso de novo carbono fóssil. evita o uso de novo carbono fóssil.

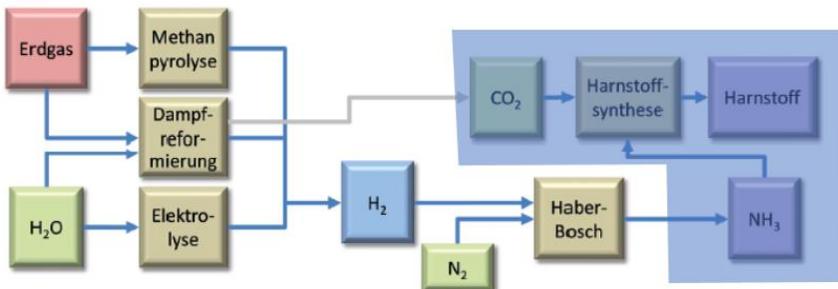


Figura 90: Produção de ureia Fonte: DECHEMA

A ureia é um composto produzido a partir do nitrogênio e do dióxido de carbono (CO₂). Mas de onde vem esse CO₂? Na produção a partir de

gás natural, é gerado CO_2 como resíduo da reforma a vapor do metano. Esse CO_2 pode ser utilizado na produção de ureia.

Porém, é importante lembrar que esse CO_2 é considerado fóssil, ou seja, proveniente de fontes não renováveis. Embora seu uso evite a utilização de carbono fóssil, ele apenas adia a liberação do CO_2 no meio ambiente. É uma solução temporária e não sustentável em longo prazo.

A síntese de ureia em si não é alterada pelo fornecimento alternativo de amônia e CO_2 de fontes separadas.

A mesma quantidade de CO_2 é emitida novamente no final da vida útil do produto, de modo que estas duas ações se equilibrem.

Em uma forma renovável de produção de ureia, o CO_2 utilizado para a reação teria que ser retirado de fontes renováveis, pois se for retirado de fontes fósseis, como na reforma do metano, ainda assim é considerado CO_2 fóssil. Mesmo que esse CO_2 seja capturado e utilizado, eventualmente ele retornará para a atmosfera, a menos que seja retirado de fontes renováveis em um ciclo fechado de produção de ureia.

4.4. Síntese de Metanol:

Globalmente, o metanol é um dos produtos petroquímicos de maior volume, produzido em plantas de até 10.000 t/dia. Na Europa, o metanol é produzido quase exclusivamente a partir de gás natural.

O metanol é um produto químico de grande importância, que atualmente é produzido a partir do gás natural. Uma das principais aplicações do metanol é como combustível, inclusive em carros de corrida, como na Nascar. Porém, acidentes com metanol são muito perigosos, pois ele queima sem emitir chamas visíveis, o que dificulta a percepção do fogo e pode levar a situações de risco.

Globalmente, cerca de 70% da produção de metanol é para produzir formaldeídos, MTBE, éter dimetílico (DME), ou ácido acético. O metanol também é utilizado como matéria-prima para a produção de cores, silicones e plásticos.

O metanol é um material de fonte geral usado como fonte de energia, um material químico básico ou um produto intermediário. Tem muitas

aplicações, por exemplo, na indústria petroquímica para produzir uma gama de compostos químicos.

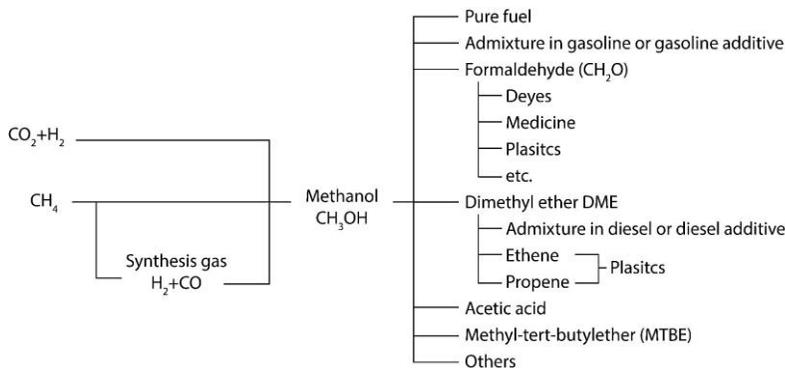


Figura 91: Síntese de Metanol. Fonte: Notas de Aula, 2023.

O metanol é um composto químico que pode ser utilizado em diversas aplicações, além de seu uso como combustível em carros de corrida. Ele pode ser empregado como matéria-prima em processos químicos e como fonte de energia em diversos outros setores. Sua versatilidade e propriedades físicas e químicas fazem dele um importante componente na indústria química.

Combinado com monóxido de carbono, o metanol pode ser usado para produzir ácido acético. Usando catalisadores zeólitos, o metanol também pode ser convertido em olefinas.

Formaldeído é um composto químico que pode ser produzido usando metanol. É um dos materiais básicos mais importantes utilizados pela indústria química. Também é usado em medicamentos e como conservante na indústria cosmética.

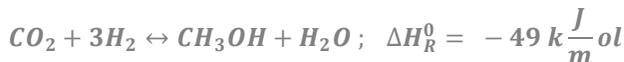
Por muitos anos, foi usado como aditivo na indústria têxtil para evitar que as roupas se enrugassem.

O metanol tem diversos usos na indústria química, como ácido acético, formaldeído, medicamentos, conservantes, na indústria de cosméticos, entre outros. Além disso, ele pode ser utilizado como aditivo em gasolina fóssil, melhorando sua característica de combustão e octanagem. Outra aplicação é o DME (éter dimetílico).

Existe uma árvore de utilização do metanol, ou seja, diversas possibilidades de uso.

Para produzir metanol, é necessário ter carbono e hidrogênio. Quando produzido a partir de gás natural, o carbono e o hidrogênio já estão presentes, mas ainda é necessário adicionar oxigênio, que pode ser obtido por admissão de ar atmosférico ou injeção de oxigênio. Em uma produção renovável, o hidrogênio pode ser obtido por eletrólise, mas o carbono precisa ser buscado em outra fonte, como a recuperação de alguma outra corrente. Fórmulas químicas:

O metanol pode ser formado a partir de monóxido de carbono e hidrogênio; ou de dióxido de carbono e hidrogênio. Ambas as reações são altamente exotérmicas. Como resultado, o reator requer uma unidade de resfriamento.



A síntese de metanol utiliza catalisadores baseados em (Zn), cromo (Cr), ou cobre (Cu), e; pressões superiores a 50 bar e; temperaturas que variam de 220 a 380°C; A eficiência é ligeiramente superior a 70%.

Nesse trecho, podemos ver a importância do carbono, hidrogênio e oxigênio na produção de CH₃OH (metanol). Para obter o hidrogênio, podemos utilizar o metano ou a eletrólise. Já para o carbono e oxigênio, podemos usar um separador de oxigênio do ar, mas ainda precisamos de uma fonte de carbono.

Atualmente, o desenvolvimento de uma fonte de carbono separada, como a biomassa, é muito cara e ainda não está totalmente pronta. É necessário avançar em tecnologias com TRL (Technology Readiness Level) mais altos para torná-las mais acessíveis.

Uma alternativa mais viável para o Brasil é o uso de biogás e biometano. Essas fontes são mais acessíveis com um potencial de produção muito grande, tornando-se uma opção sustentável e econômica.

Existem três caminhos diferentes: Síntese através da conversão indireta de metano em metanol:

- Oxidação parcial:



- Reformação a vapor exotérmico:



- Reação secundária comum:



Uma combinação de uma oxidação parcial e uma reforma a vapor exotérmica é chamada de reforma autotérmica.

A ideia principal aqui é que o caminho para a produção de hidrogênio é a utilização de fontes renováveis e uma fonte de CO_2 . É importante buscar essa fonte, que pode até mesmo ser fóssil, desde que seja possível recuperá-la de outro processo. O objetivo é utilizar cada um dos átomos necessários para a produção de metanol de forma consciente e sustentável. Assim, é possível avançar na produção de Hidrogênio Verde e na transição para uma economia mais limpa e sustentável.

A eletrólise é um processo importante para produzir hidrogênio renovável. Dessa forma, é possível obter hidrogênio puro, bem como o radical HO e oxigênio puro misturado com hidrogênio.

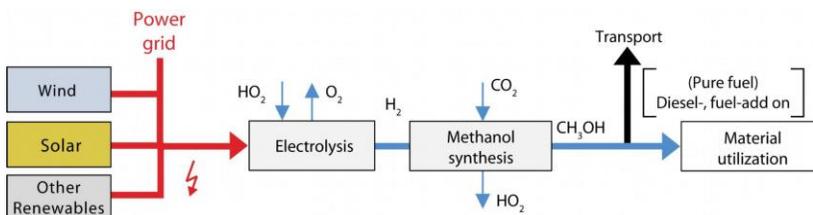
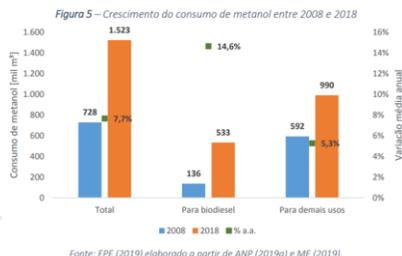
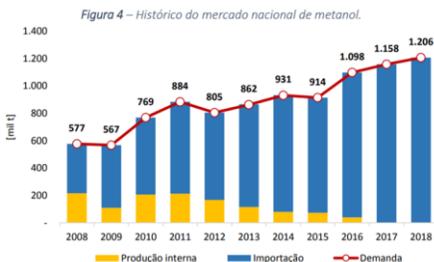


Figura 92: Energia Renovável Completa – Sistema e utilização de metanol.

Fonte: Notas de Aula, 2023.

No entanto, para chegar ao CH_3OH , que é o metanol, é necessário ter acesso ao CO_2 . O metanol é uma alternativa interessante para combustíveis fósseis em carros e pode ser usado como matéria-prima para a indústria química.



Fonte: EPE (2019) elaborada a partir de ANP (2019a) e ME (2019).

Figura 93: Metanol no Brasil. Fonte: EPE (2019)
Fonte: Notas de Aula, 2023.

4.5. Produção de Olefinas e Aromáticos:

Vários processos convencionais e alternativos estão disponíveis para a produção das olefinas etileno, propileno e butadieno e dos aromáticos benzeno, tolueno e xileno.

A figura esboça os complexos processos que existem aqui de uma forma altamente simplificada.

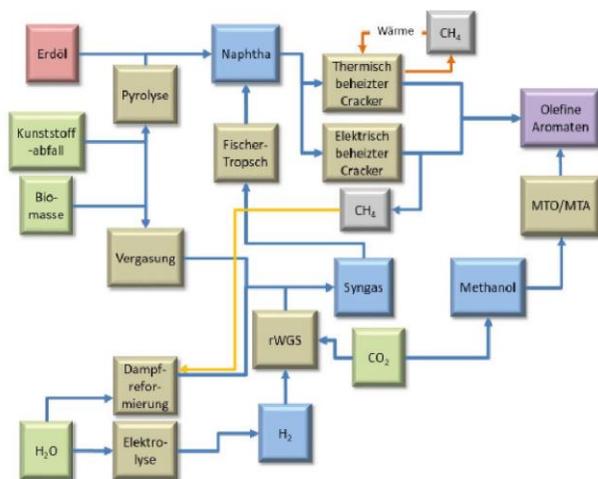


Figura 94: Produção de Olefinas e Aromáticos
Fonte: Notas de Aula, 2023.

Nesta seção do livro, vamos falar sobre a produção de olefinas e aromáticos, importantes para a indústria química e têm uma relação estreita com o petróleo e gás. Enquanto a produção de petróleo e gás é focada em extrair e derivar esses recursos, a produção de olefinas e

aromáticos envolve o que fazer com esses derivados. Vamos entender melhor como funciona esse processo e qual é a importância desses compostos na indústria química.

Para a produção de olefinas e aromáticos, a nafta química é utilizada em grande parte na indústria química, uma fração da destilação de petróleo que é convertida em uma mistura de produtos em crackers.

A entrada de matéria-prima na Alemanha é de 21,5 milhões de t/a.

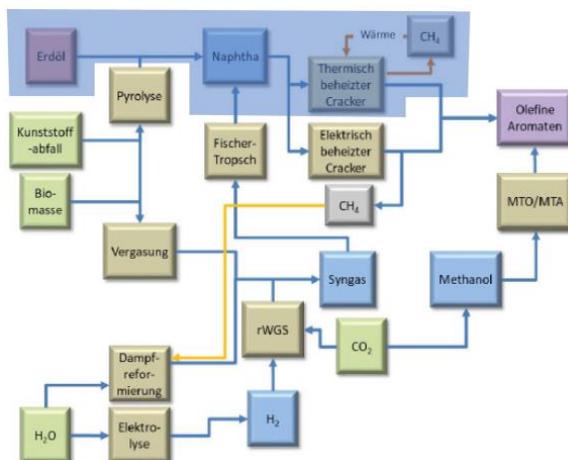


Figura 95: Produção de Olefinas e Aromáticos
Fonte: Notas de Aula, 2023.

Olefinas e Aromáticos são produtos muito utilizados na indústria química e atualmente são produzidos a partir do metano, um gás presente no petróleo e gás natural. No entanto, com a busca por fontes renováveis e sustentáveis, há um interesse crescente em produzir esses produtos a partir do Hidrogênio Verde e outras fontes de carbono renováveis.

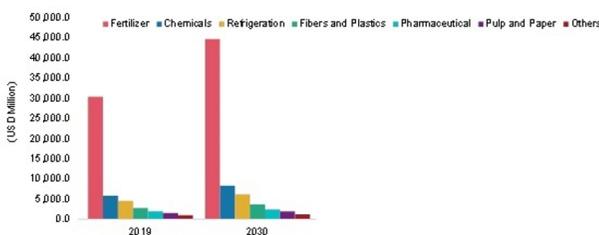
4.6. Amônia

A amônia já foi mencionada anteriormente em nosso encontro, quando discutimos a indústria química. Agora, vamos abordar especificamente a amônia dentro da indústria química, destacando suas particularidades e sua importância na introdução do hidrogênio como fonte de energia e materiais.

Vamos começar com a pergunta: como a amônia é produzida e utilizada? Já vimos um pouco sobre sua produção no encontro anterior, mas aqui vamos nos concentrar principalmente em seus usos e aplicações.

Abordaremos a amônia e sua importância na indústria química, bem como na introdução do hidrogênio na matriz energética e de materiais. A amônia é amplamente utilizada como fertilizante, sendo seu principal uso. No entanto, também possui outros empregos, como fluido de refrigeração para grandes sistemas, substituindo os refrigerantes convencionais em aparelhos domésticos e sistemas domésticos.

Desenvolvimento do mercado de amônia até 2030



- **Crescimento populacional; A demanda por alimentos aumenta; Maior necessidade de fertilizantes**
- 180 milhões de toneladas por ano (1/3 na China).
- 20 milhões de toneladas por ano na UE-27.
- 20 milhões de toneladas de amônia são comercializadas em todo o mundo.
- 80% da produção → fertilizantes - Forte crescimento do mercado esperado:

Figura 96: Desenvolvimento do mercado de amônia. Fonte: Sources: Leren, E., *Green Hydrogen for Green Ammonia, Green H₂ in Industry, 2018, Ammonia Market Size, Share, Growth | Industry Report, 2028* (marketresearchfuture.com)

Analisando o gráfico, podemos ver que o uso da amônia como fertilizante é o mais importante, e sua projeção para 2030 indica um aumento significativo na demanda. Isso se deve não apenas ao crescimento populacional, mas também ao maior acesso à alimentação das populações, o que impulsiona o aumento da demanda por fertilizantes.

A mensagem principal é que a amônia é de grande importância na indústria química e possui uma movimentação financeira significativa. Ainda hoje, sua utilização como fertilizante é majoritária.

Anteriormente, falamos sobre a produção de amônia, que passa por um processo maduro e bem estabelecido chamado de processo Haber-Bosch.

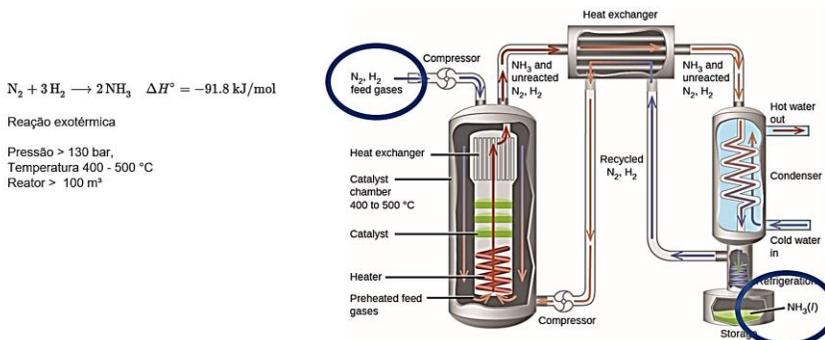


Figura 97: Processo Haber-Bosch (HB). Fonte: Wisconsin. Haber-Bosch Process.
<https://wisc.pb.unizin.org/chem109fall2021ver02/chapter/haber-bosch-process/>

Esse processo utiliza hidrogênio para produzi-la, em uma reação exotérmica que libera calor. É realizado em altas pressões, de cerca de 130 bar, e temperaturas de 400 a 500°C, o que requer equipamentos especiais para lidar com essas condições.

A produção de amônia é importante, pois é utilizada principalmente como fertilizante, além de ter outros usos menores, como fluido de refrigeração em sistemas maiores. O gráfico mostrado anteriormente indicou um aumento na demanda por fertilizantes, o que torna a produção de amônia ainda mais importante.

Outra informação relevante é que a produção de amônia pode ser integrada a outras plantas, como plantas petroquímicas, para aproveitar as correntes de calor e racionalizar a produção, reduzindo custos.

O processo Haber-Bosch tem uma entrada de corrente separada de nitrogênio e hidrogênio, e o produto final é amônia líquida. Embora o processo envolva pressões e temperaturas elevadas, é considerado relativamente simples em comparação com outras plantas petroquímicas.

Podemos entender a importância da amônia como uma forma de transportar hidrogênio com alta densidade energética. Isso ocorre

porque a amônia é líquida e, portanto, é possível armazenar mais massa por volume, o que é uma vantagem em relação ao hidrogênio, que é um gás e ocupa muito espaço.

Além disso, o hidrogênio possui um poder calorífico elevado, com 140 MJ/kg, mas sua baixa densidade energética é um ponto negativo, pois é preciso um grande reservatório para armazená-lo. Já a amônia contém hidrogênio e é líquida, o que possibilita o armazenamento com alta densidade energética.

Porém, é importante lembrar que a produção de amônia é feita por meio do processo Haber-Bosch, que necessita de hidrogênio para compor a amônia em uma reação exotérmica. Esse processo ocorre a pressões elevadas e temperaturas entre 400 °C e 500 °C, sendo necessário vasos de pressão responsáveis.

Outro ponto positivo da amônia é a sua utilização como fertilizante, sendo o seu emprego mais importante. Em 2030, é esperado um aumento na demanda por fertilizantes, o que reforça a sua relevância na matriz energética e de materiais.

Por fim, a amônia é uma substância versátil e pode ser integrada a outras plantas, permitindo a racionalização da produção e a diminuição de custos. A sua importância é gigantesca, como evidenciado pelo seu volume de movimentação financeira, e ainda é majoritariamente utilizada como fertilizante.

No processo de produção de amônia, é necessário obter nitrogênio e hidrogênio. Mas de onde vêm esses materiais? Nesta planta, podemos ver mais detalhes. Diferentemente da planta anterior, ela mostra que precisamos processar nitrogênio e hidrogênio separadamente.

O hidrogênio é obtido principalmente por reforma de metano, utilizando metano fóssil. No entanto, também podemos usar biogás ou biometano, considerados renováveis. No processo de reforma, o hidrogênio é obtido a partir da água, que fornece uma grande quantidade de hidrogênio, além de oxigênio para combinar com o carbono do metano e produzir CO₂. Isso permite a separação do CO₂, o que é muito útil.

Origem do H₂ ????

Gaseificação de carvão (19%)

Reforma de petróleo (31%)

Reforma de gás natural (50%)

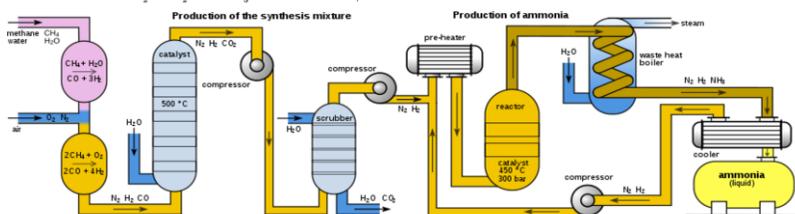
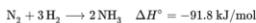


Figura 98: Processo de produção de amônia. [1] Smith et al. *Energy & Environmental Science* 2020;13:331-44. <https://doi.org/10.1039/C9EE02873K>. [2] Lan et al. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012;37:1482-1494. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.004>

Outras fontes de hidrogênio são os hidrocarbonetos derivados do petróleo, usados no refino do petróleo, ou a gaseificação de carvão, um processo antigo, maduro, mas que tem algumas restrições. A reforma a vapor de gás natural é a fonte predominante de hidrogênio porque é mais barata. É abundante e fácil de trabalhar, o que torna o custo de produção de hidrogênio a partir da reforma do gás natural cerca de US\$1,50/kg, o mais baixo entre as opções.

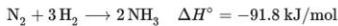
Embora a reforma do petróleo seja uma opção, é mais cara. Além disso, a gaseificação do carvão produz muito CO₂ e tem pouco hidrogênio em sua composição, o que explica por que a opção pelo metano é mais vantajosa. Embora a reforma a vapor possa ser usada para adicionar mais hidrogênio ao hidrogênio já presente no metano, são necessárias grandes quantidades de água para equilibrar a equação. Esse processo é conhecido por consumir muita água.

No final do processo, temos amônia líquida. É importante destacar que a produção de hidrogênio é um fator-chave para a produção de amônia, e que as opções para obter esse elemento apresentam vantagens e desvantagens, que devem ser consideradas para escolher a melhor opção em termos de custo e eficiência.

Para produzir Hidrogênio Verde, a alternativa atual é utilizar eletrólise, desde que a eletricidade utilizada seja proveniente de fontes renováveis. Isso é importante porque, caso contrário, não haverá vantagem em relação à produção de hidrogênio por reforma de gás

natural. Além disso, a eficiência da eletrólise é menor e os custos são mais elevados.

H₂ via fontes renováveis por eletrólise



Altamente exotérmico

Rejeitos térmicos 200-300°C

Oportunidade de integração energética

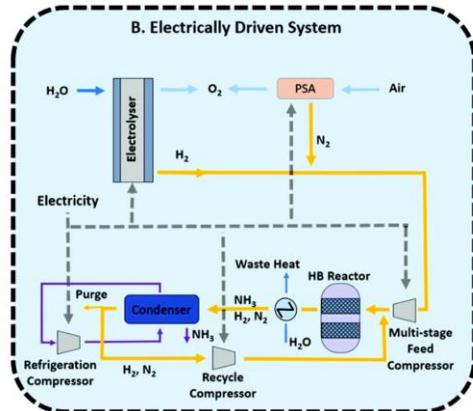


Figura 99: Produção de H₂ via eletrólise. Fonte: [1] Smith et al. *Energy & Environmental Science* 2020;13:331-44. <https://doi.org/10.1039/C9EE02873K>. [2] Lan et al. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012;37:1482-1494. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.004>

A Europa, por exemplo, enfrenta problemas no abastecimento de gás natural, o que afeta a produção de amônia e outros produtos químicos que utilizam esse gás como insumo. Nesse caso, a eletricidade proveniente de fontes renováveis pode ser uma opção viável para a produção de Hidrogênio Verde. No entanto, se não houver disponibilidade de fontes renováveis, pode-se recorrer a outras fontes de energia, como o carvão ou a energia nuclear.

A produção de Hidrogênio Verde é uma alternativa mais sustentável para a produção de hidrogênio, que atualmente é feita através da reforma do gás natural. Para isso, é necessária a utilização de eletrólise, mas é importante que a eletricidade utilizada venha de fontes renováveis, caso contrário, o processo não é vantajoso.

Na Europa, por exemplo, a falta de gás natural tem levado a um aumento na utilização de eletricidade para produção de hidrogênio. Isso pode ser feito através da utilização de fontes renováveis de energia, como energia solar ou eólica, ou ainda através da importação de energia de outras regiões ou do aumento da produção de energia nuclear ou carvão.

No entanto, é importante considerar o princípio da adicionalidade das energias renováveis, que incentiva a eletrificação dos processos para reduzir a emissão de gases poluentes. Nem todos os processos são passíveis de eletrificação, mas é importante buscar alternativas mais sustentáveis sempre que possível.

Imagine que você tenha um sistema de aquecimento em casa alimentado por gás natural e receba um incentivo para mudar para um sistema elétrico. No entanto, isso significaria aumentar o consumo de energia elétrica, o que requereria a adição de fontes de geração renováveis na rede. Caso contrário, a matriz energética ficaria ainda mais poluída e não renovável.

Essa é a ideia por trás da eletrificação de processos. Se o objetivo é produzir amônia sem utilizar a reforma de gás natural, é preciso usar um processo elétrico com eletrolisador, mas a eletricidade utilizada deve ser obrigatoriamente renovável. No entanto, recentemente essa exigência foi flexibilizada devido à escassez de energia na Europa, que está passando por uma crise energética.

Eles estão tentando economizar energia para enfrentar o inverno que está chegando, mas há uma grande demanda por calefação e, se não houver gás natural disponível, o que fazer?

Existe a possibilidade de aumentar a oferta de energia com fontes não renováveis, como carvão e energia nuclear. Alguns países têm mais opções do que outros, mas a restrição é que só se pode oferecer mais eletricidade se ela for renovável. No entanto, atualmente, não há muitas opções e a Europa está enfrentando um grande dilema energético.

É importante entender que a crise energética na Europa pode representar uma grande oportunidade para países como o Brasil, especialmente no que diz respeito à produção de hidrogênio. Ele será cada vez mais importante como commodity e nós podemos ser exportadores de amônia no futuro.

Para isso, é necessário termos um parque industrial correspondente, o que não é simples. O ideal é que nossa indústria fosse mais parecida com a Embraer, que é uma empresa de alta tecnologia e valor

agregado, do que com a JBS, que lida com commodities agrícolas. A energia é uma commodity, mas também envolve muita tecnologia.

É importante destacar que ao substituir a produção de hidrogênio por um eletrolisador, o restante do processo Haber-Bosch é igual. A única diferença é que a produção do hidrogênio é feita por eletrólise em vez da reforma de gás natural.

A produção de amônia pelo processo Haber-Bosch é geralmente utilizada em indústrias de grande porte. Esse processo tem uma demanda de energia relativamente baixa quando comparado a outros métodos, como a eletrólise. Embora a eletrólise tenha um consumo de energia mais elevado, a diferença não é tão grande assim, o que a torna competitiva.

Além disso, a tecnologia deve evoluir, com o avanço das membranas e da economia de escala, diminuindo ainda mais o consumo de energia da eletrólise.

O processo Haber-Bosch exige uma carga mínima de 20% a 30%, o que não é incomum em indústrias de grande porte. No entanto, esse processo tem alta inércia de operação, o que significa que não é possível fazer uma rampa de dinâmica alta na variação do processo.

Isso é diferente do que acontece em usinas de carvão ou gás, que respondem de forma mais rápida às variações de carga. Por exemplo, uma usina a carvão de 200 MW ou 300 MW pode levar até dois dias para sair do zero e alcançar a potência máxima, enquanto uma hidrelétrica pode começar a gerar energia quase imediatamente.

Mesmo que a eletricidade produzida por fontes renováveis seja a solução ideal para a produção de Hidrogênio Verde, é importante levar em consideração a disponibilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica para as indústrias que produzem amônia. Por isso, é necessário ter um parque industrial correspondente para garantir a competitividade da produção de Hidrogênio Verde no mercado mundial.



Haber-Bosch plant of Borealis in Linz, 2007
Image: [Ammonia plant retouch - Haber-Bosch process - Wikipedia](#)

- Devido às condições de operação com altas temperaturas e pressões, existem altos **requisitos** de material para o reator
- Operação de carga base (mínima) 20-30%,
- Baixa dinâmica (aprox. 1 dia para passar da potência mínima para a máxima)

Process	Energy demand [kWh/kg _{NH3}] [2]
Haber-Bosch (coal gasification)	10,6
Haber-Bosch (petroleum steam reforming)	11,7
Haber-Bosch (natural gas steam reforming)	7,8
Haber-Bosch (Electrolysis - Green H ₂)	10,0-12,0

Sources: [1] Smith et al. Energy & Environmental Science 2020;13:331-44. <https://doi.org/10.1039/C9EE02873K>
[2] Lan et al. International Journal of Hydrogen Energy, 2012;37:1482-1494. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.004>

Figura 100: Demanda de energia do processo Haber-Bosch. Fonte: [1] Smith et al. Energy & Environmental Science 2020;13:331-44. <https://doi.org/10.1039/C9EE02873K>. [2] Lan et al. International Journal of Hydrogen Energy, 2012;37:1482-1494. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.004>

Para garantir uma produção estabilizada de energia, é necessário utilizar fontes renováveis, como a solar e a eólica. No entanto, essas fontes são afetadas pelas condições naturais, o que pode levar a quedas no desempenho. Isso é um problema, já que a demanda de energia dos processos é constante.

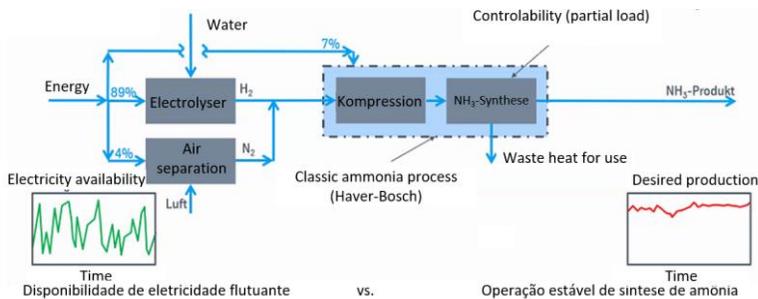


Figura 101: Intermitência das fontes renováveis. Fonte: Nölker, K., Ammonia as a hydrogen carrier, German Engineering Day, VDI, 2021.

Por isso, é importante pensar em utilizar essas energias renováveis para alimentar processos que produzem Hidrogênio Verde por meio da eletrólise, por exemplo. Dessa forma, é possível garantir uma matriz energética mais limpa e sustentável, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Existem várias maneiras de produzir amônia de forma mais sustentável, uma delas é utilizando energia renovável. Uma das tecnologias que permite isso é a célula de combustível inversa, que funciona ao contrário da célula de combustível convencional. Nessa tecnologia, a célula é alimentada com energia elétrica renovável e é capaz de produzir amônia como insumo, além de produzir oxigênio como subproduto.

Porém, é importante destacar que para essa produção ser realmente sustentável, a energia elétrica utilizada deve ser de fonte renovável. É possível utilizar as células de combustível de óxido sólido para realizar esse processo.

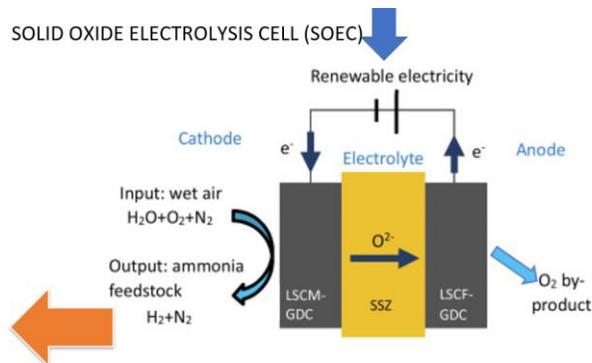


Figura 102: Produção de amônia verde com SOEC.

Fonte: Han, P., *Dynamic Green Ammonia by Haldor Topsoe*, 2021.

A produção de amônia verde com Hidrogênio Verde e eletricidade, em geral provenientes de fontes renováveis, é capaz de produzir amônia com uma quantidade de energia muito mais baixa em um futuro muito promissor.

Características da produção de amônia com células de combustível:

- Processamento eletroquímico menos maduro que o processo Haber-Bosch.
- Desempenho energético mais alto.
- Simples;
- Reduz porte do sistema;
- Menor custo de investimento.

Essa é uma produção de amônia com um desempenho energético alto, desde que se use esse tipo de célula de combustível, que é simples, pequena e tem baixo custo de investimento. Isso é bastante interessante.

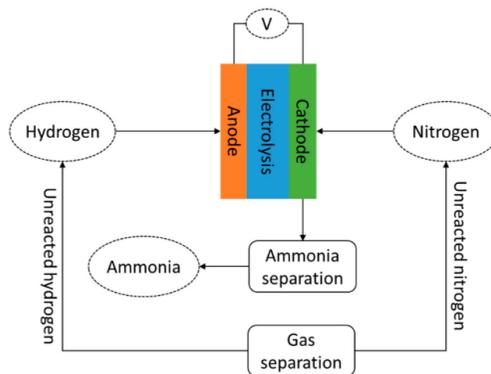


Figura 103: Produção de amônia. Fonte: <https://encyclopedia.pub/entry/1129>

No entanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre a distância do consumidor de fertilizante ou da indústria química e o fornecimento de energia renovável. Essa é uma questão na Europa e nos Estados Unidos, mas não no Brasil, onde a nossa matriz elétrica é fortemente renovável, com cerca de 80% a 85% de fontes renováveis. Além disso, temos um sistema interligado eficiente, que nos permite produzir energia em uma região e transmiti-la para outra.

Isso significa que no Brasil, a distância de fornecimento de energia renovável é bastante reduzida, o que é uma vantagem para a produção de amônia verde. Além disso, a indústria química no Brasil é relativamente nova, o que pode significar uma oportunidade de modernização com tecnologias mais limpas e sustentáveis.

Dilemas da produção de amônia verde:

Transporte eletricidade renovável para a produção de NH₃ para eletrólise no local.

versus

Transporte de Hidrogênio Verde para produção de NH₃

versus

Produção de NH₃ no local da EE com transporte de NH₃ para o consumidor em grande escala

versus

Deslocamento da geração e consumo de NH₃ para o local de ER.

Existem diferentes opções para produzir amônia verde com energia renovável, mas as escolhas não são exclusivas do Brasil. A Europa, por exemplo, precisa fazer essas escolhas e isso pode afetar a forma como o Brasil produz e exporta amônia.

Uma das opções é transportar eletricidade renovável para produzir amônia no local, mas outra possibilidade é transportar hidrogênio para produzir amônia em outro local. Porém, isso requer adaptação dos gasodutos. Também é possível produzir amônia no local e transportá-la para outro lugar, mas isso pode exigir deslocamento por terra.

Além disso, outra opção é deslocar a geração de amônia para onde há energia renovável disponível, mas isso não é uma escolha simples. A Europa tem uma matriz elétrica menos interligada e suja do que o Brasil, o que pode exigir mais eletricidade para todo o processo.

Ainda há muitas decisões a serem tomadas nesse sentido. Uma possibilidade é o Brasil se tornar um grande produtor e exportador de amônia verde, considerando que o país tem portos próximos à Europa e é um grande produtor de energia renovável. Isso seria uma oportunidade interessante para o mercado interno brasileiro, que enfrenta falta de amônia.

Por fim, a amônia verde é um produto beneficiado que tem um valor agregado superior aos outros produtos, mesmo sendo uma commodity. A rastreabilidade da energia renovável utilizada na sua produção é que confere esse valor, o que pode ser uma oportunidade interessante para o Brasil.

Olhando para o mercado de amônia verde, surgem ainda mais oportunidades. A amônia verde é comumente associada ao seu uso como insumo para a produção de fertilizantes. É importante lembrar que a amônia em si não é um fertilizante, mas sim um componente utilizado na fabricação de fertilizantes.

Além disso, ela também é utilizada na produção de derivados químicos, conhecidos como química verde. Combinando hidrogênio e nitrogênio, podemos produzir polímeros, plásticos e diversos outros materiais.

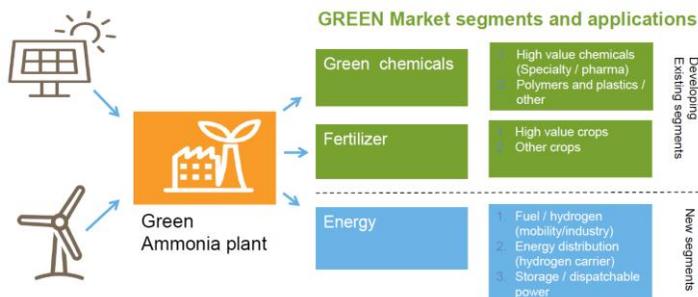


Figura 104: Segmentos de mercado para Amônia Verde. Fonte: Leren, E., *Green Hydrogen for Green Ammonia, Green H2 in Industry, 2018*.

No entanto, a amônia também pode ser vista como um vetor de transporte de energia. Quando combinamos hidrogênio e nitrogênio para produzir amônia, podemos transportá-la para locais onde é difícil transportar hidrogênio diretamente. Lá, podemos retirar o hidrogênio da amônia novamente.

É importante destacar que esse processo não é totalmente eficiente e requer esforços significativos para a produção de nitrogênio e hidrogênio, além do transporte da amônia. Mesmo assim, é uma oportunidade interessante, apesar da ineficiência inerente do processo.

No processo de produção de energia a partir da amônia verde, é possível utilizar a amônia como vetor de transporte de energia. Para isso, é necessário craquear a amônia e retornar com o hidrogênio como insumo de energia.

Para realizar esse processo inverso, é preciso fornecer calor ao sistema, que pode ser gerado por meio de um processo de integração, onde o hidrogênio é queimado e o calor resultante é utilizado no processo de craqueamento da amônia. Com essa técnica, é possível obter hidrogênio a partir da amônia líquida, e utilizá-lo como fonte de energia renovável em outros processos.

Processo comercialmente disponível para aplicações especiais de hidrogênio em pequena escala

Trabalho em desenvolvimento:

- Fonte de calor e eletricidade devem ser verde.
- Integração energética de pré-aquecimento e resfriamento.
- Pureza do produto: NH_3 e H_2 .
- Tecnologia para a etapa final de purificação (PSA versus membrana)

Estado da arte (até agora apenas pequenas plantas):
Eficiência: 80%
Temperatura: 500-600°C
Catalisador: Níquel ou Rutênio
 N_2 pode ser vendido como um subproduto

Decomposição da Amônia:

- Reação inversa da reação de formação: $2 \text{NH}_3 \rightarrow 3 \text{H}_2 + \text{N}_2$
- Processo endotérmico, necessita energia



Figura 105: Amônia para H_2 (craqueamento da amônia). Fonte: Nölker, K., Ammonia as a hydrogen carrier, German Engineering Day, VDI, 2021.

Outra forma de craquear a amônia é utilizando a mesma célula de combustível mencionada anteriormente, alimentando-a com eletricidade de fontes renováveis. Nesse processo, a amônia é colocada em contato com a célula e, por meio da eletricidade, é possível separar o nitrogênio para um lado e o hidrogênio para o outro.

Essa técnica é conhecida como célula de combustível e é considerada mais eficiente do que o processo de Haber-Bosch reverso para separação dos elementos.

Nesta fase, a eficiência é o ponto fraco do processo porque há perda de energia. Cerca de 25% a 30% da energia contida na amônia é utilizada para desidrogenizá-la.

O processo começa com as fontes de energia renovável, como eólica, solar e hidrelétrica. Aqui está o símbolo da energia nuclear, que é uma fonte de baixo carbono, embora não seja renovável. O problema está relacionado à segurança e aos resíduos nucleares.

Alguns especialistas dizem que a tecnologia avançou muito, mas ainda há preconceito contra a energia nuclear, assim como há preconceito contra aviões. Embora os acidentes com energia nuclear sejam horríveis, eles são raros e têm penalidades severas.

A economia de baixo carbono inclui a produção de amônia, que a Europa e o mundo ocidental estão reconsiderando, incluindo a possibilidade de voltar à energia nuclear. Embora seja instável, a energia nuclear é de alta densidade energética e baixo carbono. Se os

riscos e os resíduos forem controlados, pode ser uma alternativa interessante.

A amônia é produzida e transportada em fase líquida, o que é vantajoso. Em seguida, ela é craqueada para obter hidrogênio novamente, que é comprimido para ser utilizado em veículos. Há um consumo interno para verificar o EROEI, que significa a quantidade de energia que se obtém em relação à energia investida para produzir o combustível. A partir daí, é possível calcular o EROEI de forma precisa.

A produção de energia verde é baseada no processo Haber-Bosch clássico, que consiste em alimentar o processo com Hidrogênio Verde em vez de reforma de metano fóssil, sem precisar modificar a planta.

No entanto, há a geração de CO₂ durante o processo. Embora haja uso desse CO₂ na indústria petroquímica, o recurso mais comum é a captura e sequestro em depósitos subterrâneos, embora sua eficácia ainda não tenha sido comprovada em muitos casos.

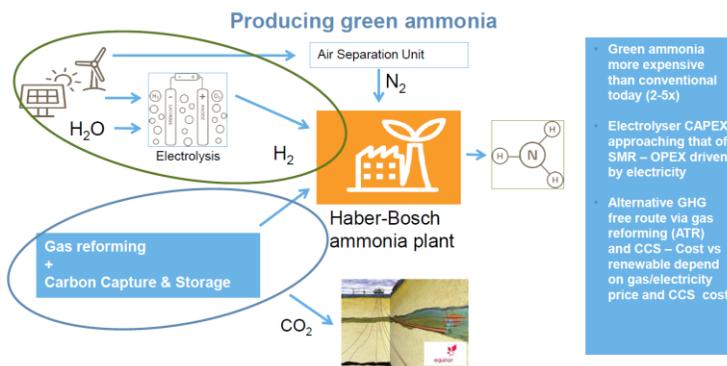


Figura 106: Produção de amônia verde. Fonte: Chatterjee, S. Limitations of Ammonia as a Hydrogen Energy Carrier for the Transportation Sector. 2021

Ao visualizar um processo, é mais fácil entender como ele funciona. Nesse caso, vamos considerar as fontes de energia renováveis, como a hídrica, eólica e solar. A partir dessas fontes, podemos realizar o processo de eletrólise para produzir hidrogênio e oxigênio como subproduto.

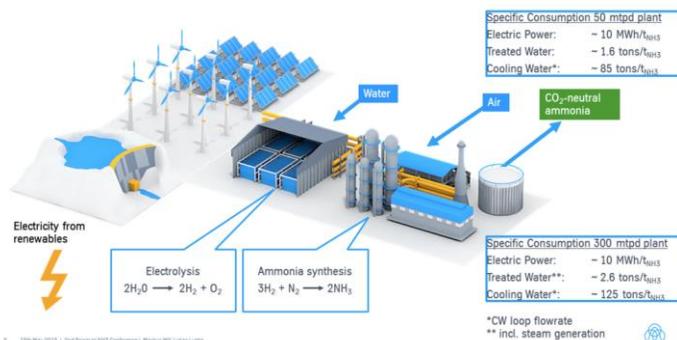


Figura 107: Power-to-Ammonia PtAmônia. Fonte: Thyssen Krupp AG, 2018, <https://www.ammoniaenergy.org/articles/green-ammonia-plants-commercially-available-today/>

Em seguida, usamos a planta Haber-Bosch para a produção de amônia. Basicamente, essa é a ideia de transformar a eletricidade em amônia.

Ao analisarmos o processo de produção de amônia verde, podemos notar que há uma perspectiva muito positiva para o futuro desse setor, principalmente devido à redução contínua de custos de energia renovável. Isso torna a introdução da amônia verde mais competitiva em relação a outras formas de energia.

Impulsionadores potenciais	Impacto
Baixo custo da ER	Competitivo
Taxação de pegada e de emissões de GEE	Competitivo
Rótulo de VERDE	Competitivo
Financiamento público	Aumenta a competitividade VERDE
ESG	Esforços corporativos

Figura 108: Fatores que influenciam a viabilidade econômica da amônia verde. Fonte: Leren, E., *Green Hydrogen for Green Ammonia, Green H₂ in Industry*, 2018.

Entretanto, também há restrições, como a imposição de taxas por emissões de gases de efeito estufa, o que pode tornar outras formas de energia mais caras. O fato de ser uma fonte de energia verde é um rótulo competitivo e pode ser muito bem visto por corporações que buscam seguir princípios de ESG (ambiental, social e governança), que são cada vez mais importantes na bolsa de valores.

O financiamento público é um papel importante no início do desenvolvimento desse setor, assim como aconteceu com a energia

eólica no Brasil e no mundo. As primeiras usinas eram financiadas, mas com a competitividade aumentando, esses financiamentos foram retirados e as usinas puderam caminhar com as próprias pernas. É importante que políticas públicas de energia sejam direcionadas para fomentar esse tipo de produção.

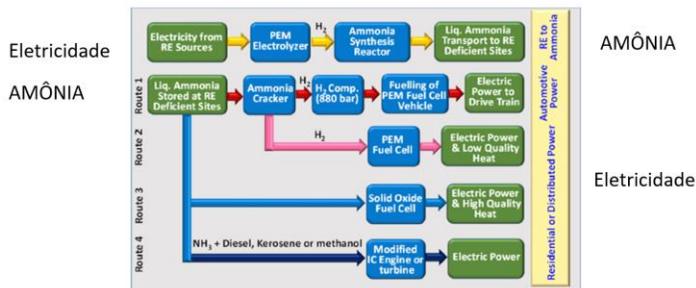


Figura 109: Caminhos da Amônia. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Neste ponto, é importante separar as coisas. Temos, por um lado, a eletricidade original proveniente de fontes renováveis e, por outro lado, a possibilidade de produzir amônia verde. A partir dela, podemos seguir quatro caminhos diferentes para chegar novamente à eletricidade.

No entanto, é importante levar em consideração as perdas de eficiência ao longo desses processos de ida e volta. As desmultiplicações indicam o quanto é gasto nessa eficiência de conversão.

Falando sobre a amônia verde como fonte de energia, é importante lembrar que estamos considerando seu uso como combustível e não como fertilizante. Então, para efeitos de comparação, podemos tomar como referência uma fonte de energia relativamente limpa, como o metano fóssil.

Se usarmos o gás natural em turbinas, por exemplo, podemos alcançar eficiências de até 33%, como mostrado aqui. No entanto, mesmo utilizando o processo de craqueamento para produzir amônia, podemos obter eficiências competitivas. Não é necessário bater na tecla de que aqui é 35 e ali deveria ser 34. A ideia principal é que, em

termos técnicos, a amônia pode ser um combustível sem carbono e competitivo.

Combustível	Eficiência mecânica [%] (Power to Power)
CH ₄	27-31
MeOH (metanol)	27-32
DME (dimetil éter – CH ₃ OCH ₃)	23-28
NH ₃	35
NH ₃ – PEM	29
NH ₃ - SOEC	39

Figura 110: Amônia como combustível: Fonte: Philibert, C., *Renewable Energy for Industry, Green H₂ in Industry*, 2018.

É importante lembrar, porém, que ainda há muito trabalho a ser feito em relação ao desenvolvimento dos processos de craqueamento e retorno do hidrogênio.

Mas, em geral, podemos concluir que o hidrogênio tem um lugar não só na eletrificação, mas também em outras áreas, como as não eletrificadas. A produção de amônia pela rota de Haber-Bosch não é novidade para o sistema industrial e não deve gerar muitas mudanças drásticas. O que muda é apenas a fonte do hidrogênio.

Agora, em relação aos fertilizantes, a amônia é fundamental para a produção deles. É importante lembrar que os fertilizantes são peças-chave na produção de alimentos.

4.7. Fertilizantes:

A produção agrícola depende de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, que podem ser divididos em macro e micronutrientes. Entre os macros, destacam-se o nitrogênio, o fósforo e o potássio, que, juntos de outros nutrientes, são fundamentais para a agricultura.

A amônia é importante para fertilizantes à base de nitrogênio.
Macro e micronutrientes necessários para a agricultura

Macronutrientes	Micronutrientes
Nitrogênio (N)	Cloro (Cl)
Fosforo (P)	Manganês (Mn)
Potássio (K)	Boro (B)
Cálcio (Ca)	Zinco (Zn)
Magnésio (Mg)	Ferro (Fe)
Enxofre (S)	Cobre (Cu)
-	Níquel (Ni)
-	Molibdênio (Mo)
-	Cobalto (Co)

Figura 111: Fertilizantes. Fonte: <https://agropos.com.br/o-que-sao-fertilizantes/>

Além desses, existem os micronutrientes, que complementam a nutrição das plantas. Nesse contexto, é importante entender como o Hidrogênio Verde e a amônia são importantes na produção de fertilizantes e como podem ser utilizados nessa área.

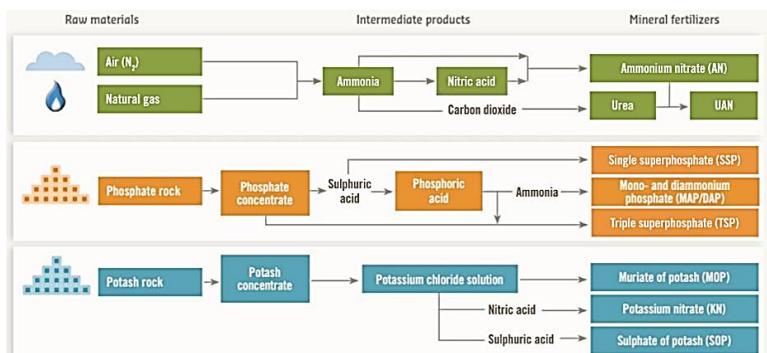


Figura 112: Produção de fertilizantes. Fonte: <https://www.fertilizerseurope.com/fertilizers-in-europe/how-fertilizers-are-made/>

Os fertilizantes são essenciais para a produção agrícola, e existem três principais macronutrientes que formam as três grandes linhas de fertilizantes: os fertilizantes com nitrogênio, os fertilizantes com fosfato e os fertilizantes com potássio.

O nitrogênio é a base dos fertilizantes, e o fosfato precisa de amônia para ser produzido, mas a base dele é o fosfato. Já o potássio precisa de nitrogênio em menor quantidade. Nesse sentido, a linha direta para a produção de fertilizantes com nitrogênio passa pela amônia.

Hoje, o processo mais comum para produzir amônia é a partir do ar para retirar o nitrogênio e do gás natural para separar o hidrogênio e

compor o NH_3 . Existem dois caminhos possíveis para chegar no produto final, que é o fertilizante mineral, sendo a ureia o mais comum a base de nitrogênio.

Porém, é importante destacar que a produção do fertilizante será mais ou menos impactada pela escolha verde da produção da amônia. É possível chegar à conclusão de que, para produzi-lo, o caminho do combustível fóssil era melhor, já que na reforma de gás natural o gás carbônico já é separado, e com a amônia verde seria necessário encontrar uma fonte de gás carbônico para produzir ureia.

Portanto, é necessário avaliar os prós e contras da produção de fertilizantes a partir da amônia verde, considerando o impacto ambiental e a disponibilidade dos recursos necessários para a produção. O papel da amônia verde é importante, mas é preciso levar em conta que o fertilizante é fundamental para a produção de alimentos.

No contexto da produção de fertilizantes, é necessário ter em mente que a amônia é um componente fundamental para a produção de ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), um dos principais fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura. Entretanto, para produzir ureia a partir da amônia, é necessário ter CO_2 disponível. O problema é que nem todas as fontes de amônia fornecem CO_2 de forma acessível.

**Produção de fertilizante nitrogenado com amônia verde:
 CO_2 é necessário para produzir ureia verde, mas não para nitrato de amônio**

As fontes sustentáveis de CO_2 são:

- Subproduto da usina termelétrica a biomassa.
- Subproduto de refinarias ou indústria química

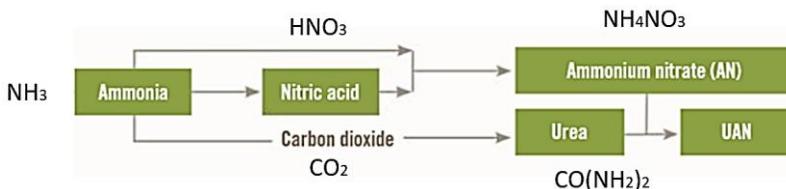


Figura 113: Produção de nitrato de amônio. Fonte: <https://www.fertilizerseurope.com/fertilizers-in-europe/how-fertilizers-are-made/>

As refinarias, por exemplo, não são uma boa fonte de CO₂ para a produção de ureia, a menos que sejam biorrefinarias. Já a captura direta de CO₂ do ar atmosférico não é uma opção viável, pois o ar contém pouco CO₂ em relação a outras fontes como o gás de combustão. Por isso, é mais indicado recuperar o CO₂ dos gases de combustão direto da chaminé, onde a concentração é maior.

Produzir CO₂ para produzir ureia não é uma tarefa simples. Por isso, outra opção que se apresenta é utilizar o nitrato de amônia (NH₄NO₃), que é feito a partir da reação da amônia com o ácido nítrico (HNO₃). O nitrato de amônia tem vantagens em relação à ureia, como ser mais efetivo na fertilização do solo e ter ação imediata.

Sendo assim, na produção de fertilizantes nitrogenados é importante considerar tanto a fonte de amônia quanto a disponibilidade de CO₂ para produzir ureia. O nitrato de amônia pode ser uma alternativa viável e vantajosa em algumas situações.



Amônia



Ácido Nítrico

Nitrato de Amônia

A produção de amônia pode levar a duas rotas diferentes para a produção de fertilizantes: ureia ou nitrato de amônia. Para produzir ureia, é necessário o uso de CO₂, o que pode ser um problema na busca por uma produção mais verde.

Já na produção de nitrato de amônia, esse problema é contornado, uma vez que é possível utilizar ácido nítrico em conjunto com a amônia. Essa rota pode ser viável e vantajosa, já que é possível utilizar o Hidrogênio Verde e outras fontes de oxigênio na produção do ácido nítrico. Dessa forma, a produção de nitrato de amônia verde pode ser uma opção interessante para a produção de fertilizantes.

Sobre o nitrato de amônia, no dia 4 de agosto de 2020, ocorreu uma grande explosão em Beirute, capital do Líbano, que deixou mais de 100

mortos e 5.000 feridos. A causa da explosão foi a ignição de uma carga de 2.750 toneladas de nitrato de amônio que estava armazenada no porto da cidade.

Os danos materiais foram inúmeros e o impacto das explosões foi tão forte que foi registrado como um terremoto de magnitude 3,3 pelos sensores do Instituto Americano de Geofísica (USGS), com potência de aproximadamente 1,8 quilotons de TNT.

Esse incidente serve como alerta para a importância de um manuseio seguro e adequado de compostos químicos perigosos, como o nitrato de amônio.

Em 2020, ocorreu um trágico incidente em Beirute envolvendo nitrato de amônio mal acondicionado. Uma carga de um navio que foi colocada em um silo no meio do porto da cidade ficou anos nessa situação. A negligência resultou em uma explosão horrorosa que matou muitas pessoas e praticamente destruiu a cidade, comparado com uma bomba atômica.



Figura 114: Explosão em Beirute envolvendo nitrato de amônio (2020). Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Urea>

Infelizmente, esse não foi um caso isolado. Em 1947, aconteceu o Desastre de Texas City nos EUA, considerado o mais mortífero acidente industrial da história do país.

O incidente foi causado pelo calor gerado por um incêndio no cargueiro francês SS Grandcamp, que levou a uma explosão de grandes proporções de cerca de 2.086 toneladas de nitrato de amônio,

destruindo o porto e grande parte da cidade de Texas City e causando a morte de 581 pessoas.

No mundo da produção de fertilizantes, o nitrato de amônio é uma substância que apresenta riscos e perigos. Isso ficou evidenciado em dois incidentes marcantes na história, um em 1947 na cidade de Texas City nos Estados Unidos e outro em 2020 na cidade de Beirute, capital do Líbano.

Ambos ocorreram devido a explosões de cargas de nitrato de amônio que estavam mal acondicionadas, causando mortes, destruição e danos materiais significativos. Embora seja uma substância controlada, é importante tomar medidas de segurança ao manusear e transportar o nitrato de amônio.

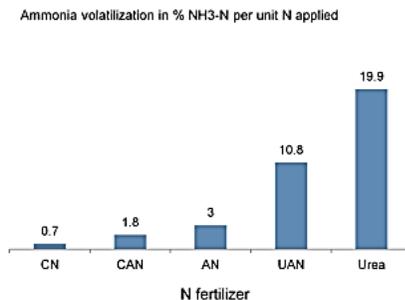
Na tabela abaixo, temos uma lista completa dos fertilizantes mais importantes e difundidos, entre eles o nitrato de amônio e a ureia. Ambos são eficazes, mas também possuem riscos associados.

	Fertilizers	Forms of nutrient	N%	Others	Nature
Nitrato de Potássio	KNO ₃	Nitrate	13.85	K ₂ O-46-47	Basic
Nitrato de Cálcio	Ca(NO ₃) ₂	Nitrate	15.5	Ca-19.4	Basic
Nitrato de Sódio	NaNO ₃	Nitrate	16		Basic
Sulfato de Amônia	(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammoniacal	20.6-21	S-24.5	Acidic
Clorato de amônio	NH ₄ Cl	Ammoniacal	25.5-26	Cl-66	Acidic
Nitrato e sulfato de Amônia	(NH ₄) ₂ SO ₄ . NH ₄ NO ₃	Ammoniacal	26	S-15	Acidic
Nitrato de cálcio e amônia	CAN	Ammoniacal and Nitrate	25-28		Neutral
Nitrato de amônia	NH ₄ NO ₃ (Highly hygroscopic)	50%- Ammonium 50%- Nitrate	33-35		Acidic
Solução de amônia e água	Anhydrous ammonia	Ammoniacal	80-82		Highly Acidic
Urea	Urea [CO(NH ₂) ₂]	Amide	46		Acidic
Calcium cyanamide	CaCN ₂	Amide	20.6-21		Basic

Figura 115: **Comparação** Fertilizantes nitrogenados, Fonte: <https://www.slideshare.net/krishnaSethi1/fertilizer-and-its-classification>

Esses e outros fertilizantes são derivados da amônia, que é a base para a produção deles. Por isso, é importante produzir amônia verde, ou seja, a partir de fontes renováveis, e não mais dependente de combustíveis fósseis.

- Volatilization of ammonia gas contributes to pollution, affects air quality and induces soil acidification
- The use of organic or urea-based nitrogen fertilizer represents the main driver for ammonia losses
- Nitrate-based N fertilizer or immediate incorporation of urea into the soil avoids volatilization losses



Reference: EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013

Figura 116: Perdas com fertilizantes. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

O nitrato de amônio é um fertilizante muito interessante porque tem menos perdas do que a ureia. Isso significa que ele tem um rendimento maior do que a ureia.

O importante está aqui. Em uma leitura simplificada, ao optar pelo nitrato de amônia, sua decomposição imediata repercute nas raízes das plantas.

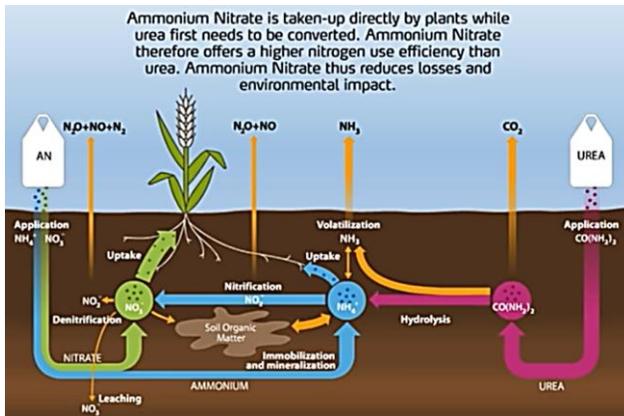


Figura 117: Ureia e nitrato de amônia no solo. Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=Ekx84-T5GLk>

Já com a ureia, há uma série de processos até a chegada às raízes, o que a torna mais rentável. Ela reduz perdas e converte melhor o nitrogênio para a necessidade da planta, sendo absorvida no solo.

No caso brasileiro, é importante destacar o uso de fertilizantes no mundo e, em particular, no Brasil.

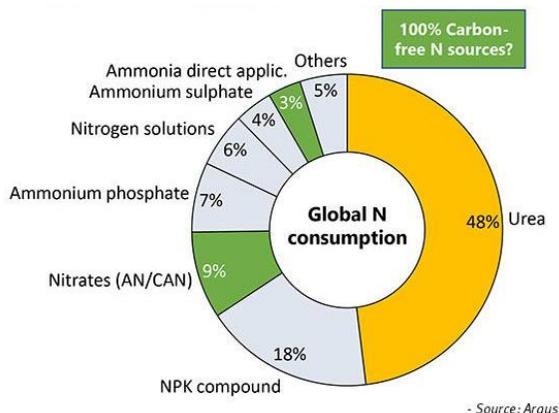


Figura 118: Consumo mundial de fertilizantes nitrogenados por produto (2018). Fonte: <https://www.argusmedia.com/en/blog/2021/may/19/decarbonizing-the-fertilizer-industry-is-green-ammonia-the-answer-or-should-we-focus-elsewhere>

Os fertilizantes nitrogenados que utilizam a amônia como base têm na ureia a sua principal representante, ocupando cerca da metade do mercado.

Além da ureia, o NPK também é um fertilizante muito utilizado, e neste caso, o “N” também é obtido a partir da ureia. Mais da metade dos fertilizantes nitrogenados utilizados vem da rota da ureia, enquanto o nitrato de amônio representa menos de 10% do mercado, apesar de suas vantagens.

O aspecto de segurança é um fator que pesa muito nessa escolha, uma vez que acidentes com nitrato de amônia podem ser fatais, assim como em um acidente aéreo.

Na utilização de fertilizantes, o nitrogênio é um dos principais nutrientes necessários para as plantas. De acordo com esta tabela, que mostra a repartição do uso de fertilizantes nos principais países, é possível perceber que o azul-escuro representa os fertilizantes nitrogenados.

Os Estados Unidos, Canadá, China e Índia utilizam uma quantidade considerável deles. A França, Alemanha, Ucrânia e Rússia também utilizam quantidades significativas de fertilizantes nitrogenados.

FERTILIZER USE (2018)

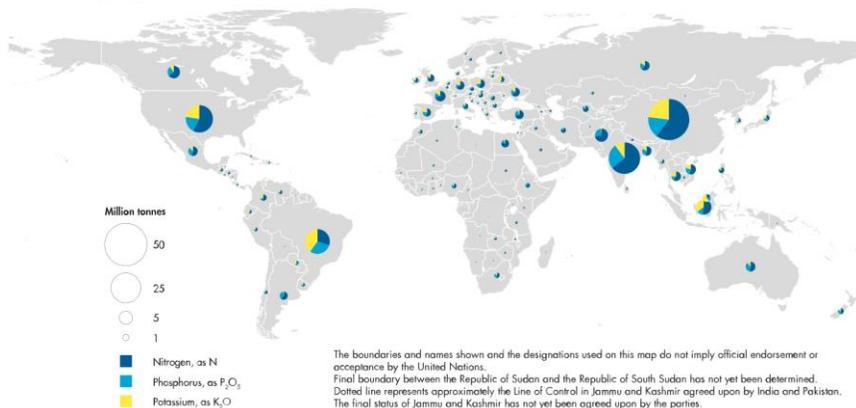


Figura 119: Uso de fertilizante por país (2018). Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fertilizer>

No Brasil, a repartição do uso de fertilizantes é equilibrada entre os três compostos principais: nitrogênio, fósforo e potássio. Isso é diferente do restante do mundo, que utiliza mais fertilizantes nitrogenados. É importante entender o papel dessa repartição no Brasil e o porquê de isso acontecer.

A explicação para a repartição equilibrada de compostos nitrogenados no Brasil está relacionada com a produção de soja. A soja tem a capacidade de fixar o nitrogênio do ar diretamente pelas suas raízes, o que a torna menos dependente de compostos nitrogenados para a sua produção.

Como o Brasil é um grande produtor de soja, essa característica reduz a nossa dependência de compostos nitrogenados no aspecto global.

Isso não significa que outras culturas não necessitem de fertilizantes nitrogenados, mas no geral, a produção de soja contribui para essa repartição equilibrada.

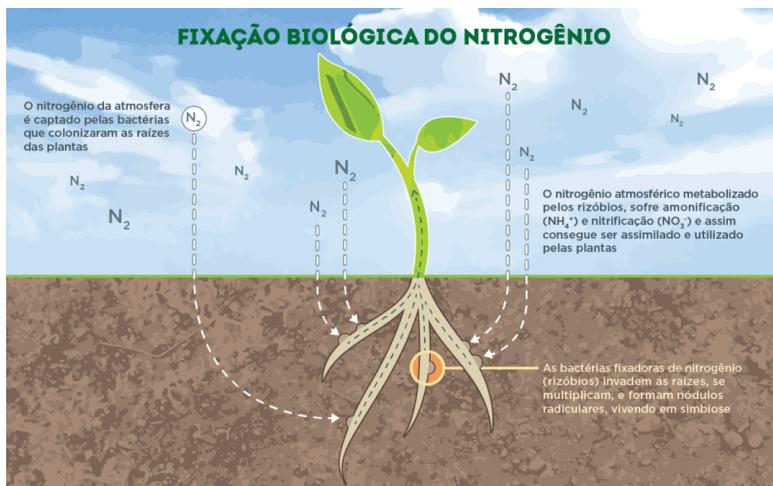


Figura 120: Fixação biológica do nitrogênio.

Fonte: <https://www.digifarmz.com/blog/fixacao-biologica-nitrogenio/>

No Brasil, há um grande problema relacionado à produção e importação de fertilizantes. Nós somos importadores de fertilizantes e nossa produção interna não é suficiente para atender à demanda.

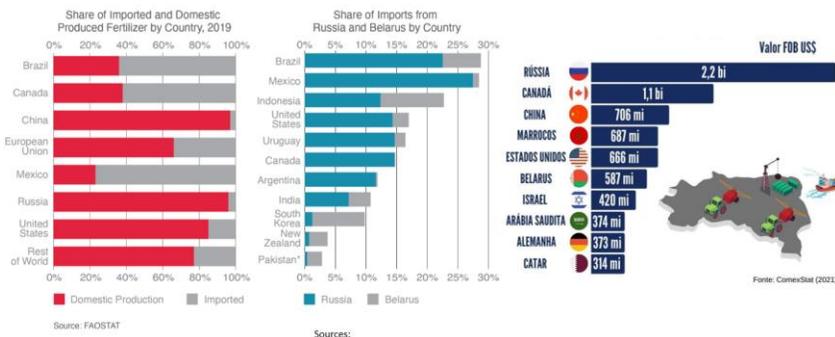


Figura 121: Exportação de fertilizantes para o Brasil. Fonte: (1)

<https://www.nordeste1.com/2022/03/02/agronegocio-descubra-quanto-o-brasil-importa-de-fertilizantes-da-russia/>. (2) <https://www.fas.usda.gov/data/impacts-and-repercussions-price-increases-global-fertilizer-market>

Enquanto outros países, como a China, Rússia e Estados Unidos, são autossuficientes e produzem tudo o que precisam, o Brasil produz apenas 40% do que consome. Isso é um problema, especialmente considerando que a agricultura é uma potência no país e depende muito desse insumo para a produção.

Atualmente, importamos fertilizantes principalmente da Rússia e Bielorrússia. No entanto, com os problemas climáticos enfrentados por esses países, a situação pode se tornar ainda mais complicada. É preciso repensar essa dependência e buscar soluções para aumentar a produção interna de fertilizantes, aproveitando as oportunidades do mercado.

Os fertilizantes são essenciais para a produção agrícola e o Brasil é um grande importador de fertilizantes, principalmente de nitrogênio, importando da Rússia e China, países que podem ter questões diplomáticas envolvidas.

Essa dependência pode ser uma vulnerabilidade para a produção agrícola brasileira.

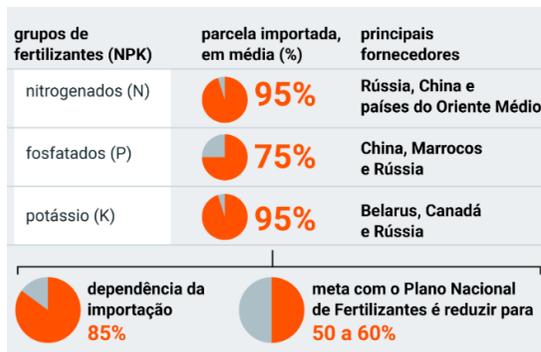
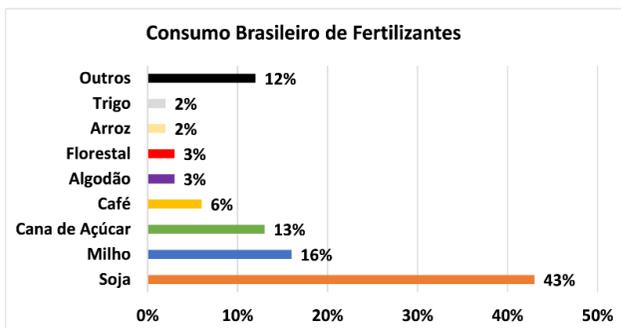


Figura 122: Produção de fertilizantes no Brasil. Fonte: <https://www.poder360.com.br/agronegocio/com-85-dos-fertilizantes-importados-brasil-lanca-plano-de-producao-local/>

Por isso, existe um plano nacional de fertilizantes com o objetivo de inverter essa situação, aumentando a produção interna de fertilizantes e reduzindo a dependência de importação. A produção de ureia verde ou amônia verde é uma das estratégias para alcançar essa meta.

O consumo de fertilizantes no Brasil é grande devido à cultura da soja, que é o principal produto agrícola do país. A soja é uma cultura que tem a capacidade de fixar o nitrogênio do ar diretamente pelas suas raízes, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados.



(Fonte: Agropós, 2020)

Figura 123: Consumo de fertilizantes no Brasil. Fonte: <https://agropos.com.br/o-que-sao-fertilizantes/>

No entanto, outras culturas ainda dependem desses insumos. É importante ressaltar que a produção de fertilizantes no Brasil é insuficiente, deixando o país dependente da importação de fertilizantes, principalmente da Rússia e da China.

Para reduzir essa dependência, o país tem investido em planos nacionais de fertilizantes, que visam aumentar a produção interna, incluindo a produção de fertilizantes a partir da rota da ureia verde ou da amônia verde, produzidas a partir de fontes renováveis de energia.

Os dados mostram que o uso de fertilizantes representa uma parcela significativa do custo de produção, podendo chegar a 30%.



Figura 124: Preço de fertilizantes no Brasil. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Isso significa que é um fator importante a ser considerado na produção agrícola. O tipo de fertilizante utilizado também pode influenciar no

custo final do produto. Portanto, é necessário avaliar cuidadosamente a relação custo-benefício do uso de fertilizantes na produção.

Nesta figura, podemos observar informações sobre o preço da ureia e como ele aumentou em função da invasão da Ucrânia pela Rússia.

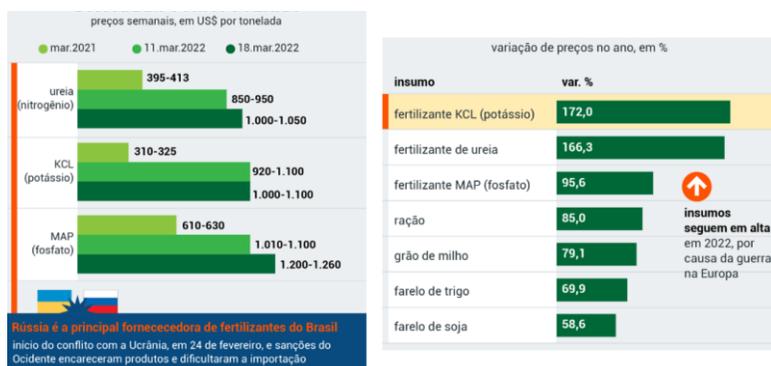


Figura 125: Preço de ureia durante o conflito entre Ucrânia e Rússia. Fonte: <https://www.poder360.com.br/agronegocio/com-85-dos-fertilizantes-importados-brasil-lancao-plano-de-producao-local/>

A ureia é um dos principais fertilizantes utilizados na agricultura, sendo um composto químico à base de nitrogênio que ajuda no crescimento e desenvolvimento das plantas. A variação de preço é um fator importante a ser considerado pelos produtores, uma vez que pode impactar diretamente nos custos de produção e, conseqüentemente, no preço final dos produtos agrícolas.

A figura seguinte, é muito importante para entendermos a relação entre a produção de grãos e o consumo de fertilizantes no Brasil nos últimos 30 anos. Em azul, podemos ver a nossa produção de grãos desde 1992/1993, que foi colocado aqui com o valor unitário 100 só para termos uma referência.

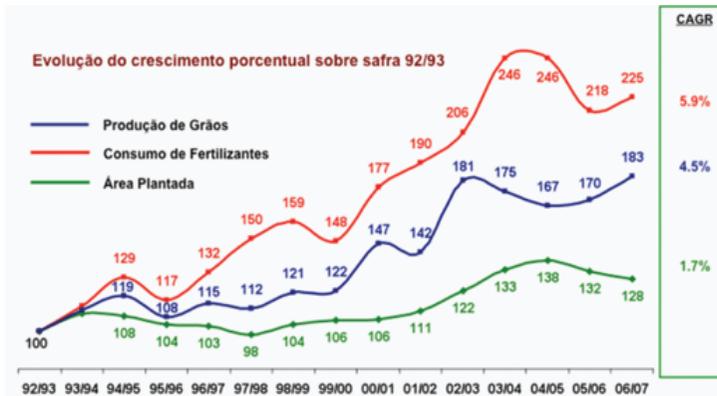


Figura 126: Impacto dos Fertilizantes na Produção e Uso do Solo. Fonte: <https://www.bh1.com.br/agronegocio/o-mercado-de-fertilizantes-no-brasil-e-as-influencias-mundiais/>

Desde então, tivemos um aumento de 83% na produção de grãos no país, o que é bastante significativo. Mas, nesse mesmo período, o consumo de fertilizantes aumentou ainda mais. Ou seja, a produção de grãos não cresceu na mesma proporção que o consumo de fertilizantes.

No entanto, é importante observar que a produtividade da terra também aumentou. Isso significa que, quanto mais fertilizantes são usados, menos área é necessária para plantar e colher a mesma quantidade de grãos. Esse é o conceito de produtividade. E isso tem um impacto significativo na preservação das florestas e na redução da necessidade de desmatamento para ampliar a área plantada.

Esse é um dos paradigmas que a tecnologia agrícola foi capaz de quebrar. Antes, acreditava-se que o crescimento populacional levaria a um aumento exponencial no consumo de recursos naturais, o que seria insustentável. Mas, graças ao aumento da produtividade proporcionado pelos fertilizantes, conseguimos produzir mais alimentos usando menos recursos naturais e preservando o meio ambiente.



Figura 127: Desenvolvimento do preço de fertilizante

Fonte: Agrinvest Commodities (<https://www.noticiasagricolas.com.br/noticias/soja/303523-fertilizantes-continuarao-a-subir-de-preco-para-safra-22-23-mas-produtor-brasileiro-deve-garantir-boas-margens-de-renda.html#.YOXF5XbMKM8>)

A ureia é um fertilizante muito importante para o Brasil e tem grande participação em nossa dependência de importação. Nós importamos ureia de outros países para suprir nossa demanda interna. Essa dependência é um ponto a ser considerado no planejamento da produção agrícola nacional.

A produção orgânica de alimentos utiliza fertilizantes não sintéticos, como compostos produzidos naturalmente. A ureia e a amônia são fertilizantes sintéticos produzidos pela indústria química.

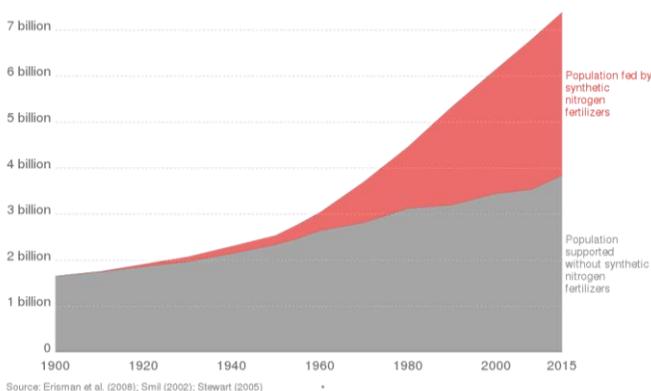


Figura 128: Fertilizantes nitrogenados sintéticos vs naturais. Fonte: Erisman et al. (2008), Smil (2002), Stewart (2005). <https://en.wikipedia.org/wiki/Fertilizer>

No entanto, com técnicas de compostagem e manejo do solo, é possível cultivar alimentos sem a necessidade intensiva de fertilizantes sintéticos.

A figura apresentada mostra que atualmente temos mais fertilização natural do que sintética, mas a projeção indica que a demanda por fertilizantes sintéticos irá aumentar significativamente, aumentando a nossa dependência. É importante pensarmos em alternativas, como o Hidrogênio Verde, para reduzir essa dependência e garantir uma produção sustentável de alimentos.

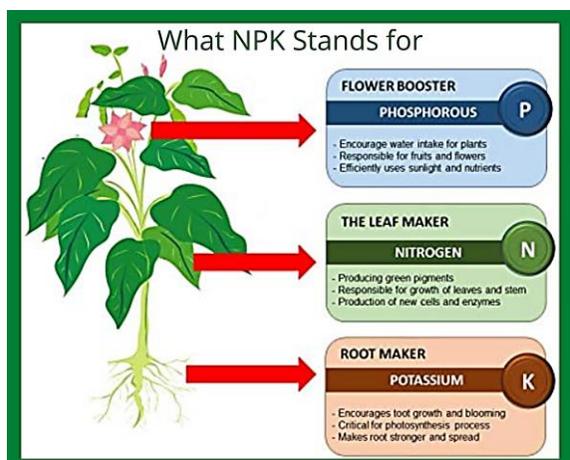


Figura 129: Fertilização em plantas. Fonte: <https://www.lawnsbesty.com/what-does-npk-stand-for/>

Para entender quando usar os fertilizantes NPK, é importante saber como cada um deles age nas plantas. O nitrogênio é importante para a saúde das folhas, e uma falta desse nutriente pode deixá-las amareladas. O potássio, por sua vez, contribui para a qualidade das raízes. Já o fósforo é essencial para a produção de flores e frutos.

É importante lembrar que esses três nutrientes trabalham juntos e são igualmente importantes para garantir uma produção saudável e de qualidade. Por isso, é recomendado usar um fertilizante NPK completo, que contenha esses três nutrientes em proporções adequadas.

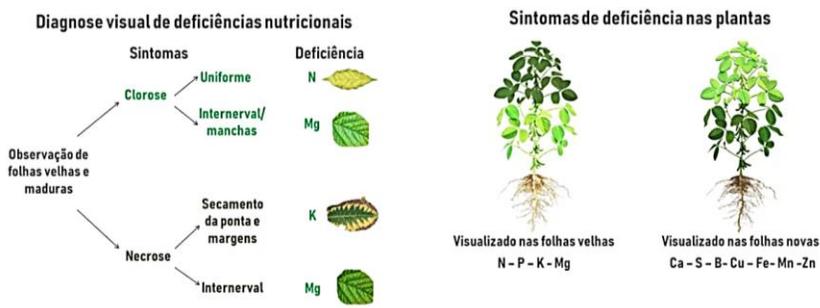


Figura 130: Impacto da fertilização (Deficiência nutricionais de plantas). Fonte: <https://blog.aegro.com.br/adubacao-potassica-em-soja/>

Podemos entender que, se as folhas de uma planta apresentam baixa coloração, pode ser sinal de deficiência nutricional. Para identificar a deficiência e corrigi-la, é necessário observar as folhas que ficam velhas. Essa é uma dica básica para os produtores manterem a saúde e o vigor das plantas cultivadas.

O mercado global de fertilizantes é amplo e diversificado, abrangendo tanto produtos orgânicos como sintetizados.

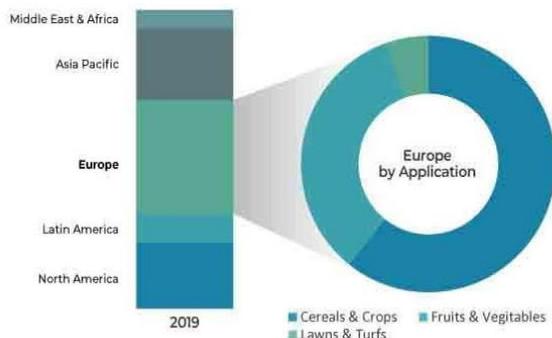


Figura 131: Fertilizantes orgânicos. Fonte: <https://menafn.com/1104111604/Organic-Fertilizer-Market-Classification-By-Suppliers-Consumption-Application-And-Overview-By-2019-2029>

No entanto, nos últimos anos, tem-se observado um aumento significativo na demanda por fertilizantes sintetizados, o que reflete a importância crescente desses produtos para a agricultura mundial. É fundamental entendermos os diferentes tipos de fertilizantes e suas aplicações, de forma a garantir a produtividade e a qualidade dos cultivos de maneira sustentável e eficiente.

A foto a seguir, foi tirada na Barra da Tijuca, no Rio de Janeiro. Infelizmente, o que está desaguando no mar é esgoto. Esse problema é comum em muitas regiões do Brasil, pois temos um baixo número de coleta e tratamento de esgoto. Isso acaba gerando um impacto negativo no meio ambiente, inclusive na produção agrícola.



Figura 132: Esgoto em Barra da Tijuca, Rio de Janeiro. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Porém, essa situação pode ser uma oportunidade para produzir fertilizantes sintéticos a partir dos componentes ativos do esgoto. Isso já é feito em algumas composteiras, onde o esgoto é tratado para retirar a carga orgânica nitrogenada e transformá-la em fertilizante. Além disso, é possível utilizar os rejeitos que possuem componentes orgânicos para produzir um adubo rico em nitrogênio e outros nutrientes.

Dessa forma, temos alternativas para não depender exclusivamente da produção de fertilizantes sintéticos convencionais, como a amônia e a ureia, e podemos criar cadeias de valor para gerar benefícios econômicos e ambientais. A produção de Hidrogênio Verde a partir de fontes renováveis também pode ser uma opção viável e sustentável para a produção de fertilizantes.

A Petrobras já foi uma grande produtora de amônia, ureia e metanol no Brasil, mas atualmente tem se retirado desse mercado para se dedicar exclusivamente à produção de petróleo, sua principal fonte de renda.



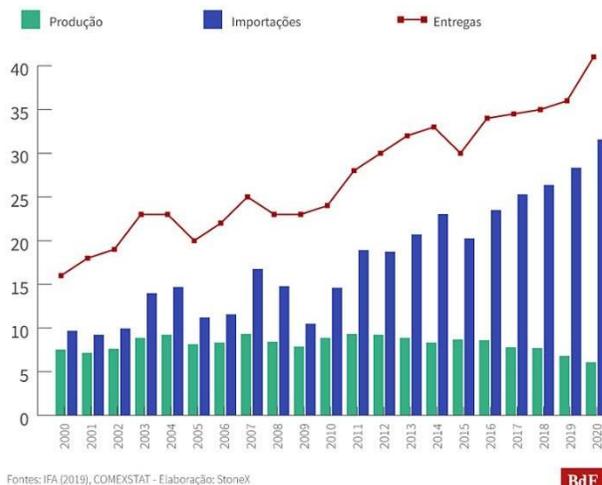
- Planta de produção de UREA Araucária (Petrobrás / Paraná)
- Amônia
- Uréia
- Metanol
- Vapor
- As mesmas plantas podem ser convertidas em GN, biomassa e H2... (é necessário investimento e adaptação)

Gasification Plants (GENERAL)

Figura 133: Produção de fertilizantes. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

As plantas de produção de fertilizantes já foram mais importantes no país, mas atualmente a empresa tem se concentrado em outras áreas de atuação.

No panorama brasileiro, podemos visualizar a quantidade de fertilizantes que importamos em azul e a quantidade que produzimos em vermelho. A diferença entre as duas curvas é significativa e representa um risco para o país que depende muito do setor agrícola.



Fontes: IFA (2019), COMEXSTAT - Elaboração: StoneX

BdF

Figura 134: Mercado e Demanda de Fertilizantes no Brasil. Fonte:

<https://www.brasildefato.com.br/2022/03/02/petrobras-fecha-fabricas-e-expoe-brasil-a-falta-de-fertilizantes-russos-durante-guerra>

Para reverter essa situação, existe o Plano Nacional de Fertilizantes que busca incentivar a produção de fertilizantes renováveis, ou seja,

produzidos a partir de eletricidade renovável, matérias-primas renováveis e através do uso de Hidrogênio Verde.

A amônia é um importante insumo na produção de fertilizantes, além de ser utilizada como carregador e armazenador de energia. A partir da amônia, o hidrogênio é um dos componentes mais importantes, formando a molécula NH_3 . Para seguir as tendências atuais, o hidrogênio deve ser produzido a partir de fontes renováveis.

5. Hidrogênio Verde em edifícios

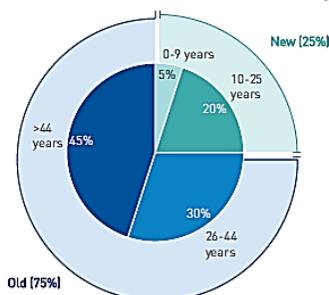
O uso do Hidrogênio Verde em edifícios inserido em um contexto amplo que une a energia em edificações. Vamos nos concentrar em como o Hidrogênio Verde pode fazer parte da solução para a demanda energética em edifícios, reduzindo as emissões de CO_2 e de carbono, e contribuindo para a habitabilidade das pessoas que os habitam.

Este assunto em particular é facilmente compreensível, já que se trata da nossa própria casa. Quando falamos sobre plantas industriais, alguns podem ter noção, mas outros talvez não tenham experiência. No entanto, quando falamos de edificações, tudo fica mais tangível, mais fácil de entender e de se identificar.

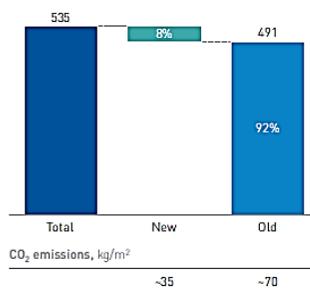
Atualmente, há uma movimentação ampla e positiva em relação aos edifícios, com o objetivo de torná-los mais confortáveis e com emissão zero. Isso significa não apenas gerar energia, mas também captá-la de forma sustentável, além de considerar a importância dos materiais na redução das emissões.

Aqui, nosso foco é a introdução do hidrogênio como fonte de energia, visando a redução de emissões. Vale lembrar que na Europa, a questão das emissões é urgente e a falta de gás natural é um desafio, tornando o hidrogênio uma grande solução.

Buildings stock in Europe
Percent of age category



Emissions from buildings stock,¹
Mt CO₂ and shares, percent of age groups



¹ Assumption: EU buildings emissions [both domestic and commercial] in line with German domestic emissions

Figura 135: Emissões de GEE do setor imobiliário na EU. Fonte: FCH JU, Roteiro do Hidrogênio Europa, 2019.

Na Europa, é comum encontrar muitos edifícios antigos. Um dado interessante é que 75% das emissões de CO₂ provenientes de edifícios são geradas por edifícios antigos, enquanto apenas 1/4 das emissões são geradas por edifícios novos. Isso ocorre porque os edifícios novos possuem melhores equipamentos e isolamento térmico, resultando em um melhor desempenho energético e menor gasto de energia.

É importante lembrar que o dado se refere às emissões geradas pelas edificações e não à quantidade de edifícios antigos e novos. Essa é uma oportunidade de negócio para justificar a construção de novos edifícios, que seriam mais eficientes e menos poluentes, assim como ocorre com a indústria automotiva, em que os carros mais antigos costumam poluir mais do que os modelos mais recentes.

O emprego do hidrogênio apresenta um grande potencial e podemos utilizá-lo de forma inovadora em edificações.

Grande potencial do H₂ → aquecimento e transporte

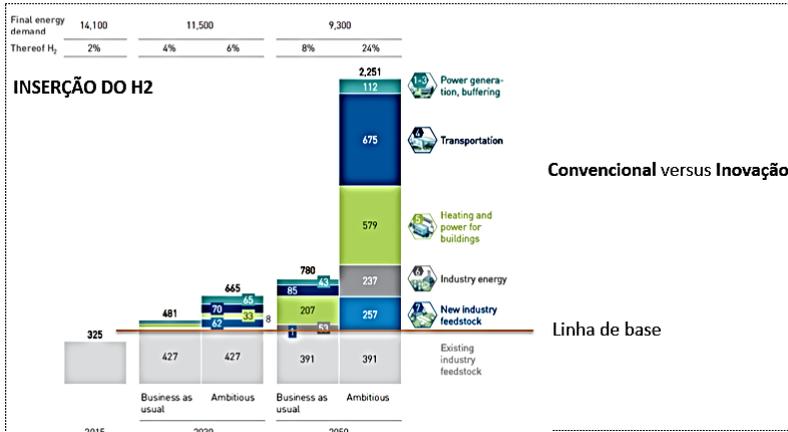


Figura 136: Roteiro do Hidrogênio Europa. Fonte: : Roteiro do Hidrogênio Europa: Um caminho sustentável para a Transição Energética Européia | www.fch.europa.eu, 2019

Olhando para o futuro, mais especificamente para o período entre 2030 e 2050, podemos imaginar o que acontecerá se continuarmos seguindo os padrões convencionais de construção, comparado com o que pode ser alcançado por meio da inovação nesse setor.

Pontos-chave do estudo da UE:

- H₂ e biogás como opção para edifícios existentes sem grandes medidas adicionais (compatibilidade com edifícios existentes)
- Bomba de calor e hidrogênio ☒ solução ideal
- Bomba de calor ☒ eletrificação para calor
- H₂ ☒ calor diretamente
- Conversão gradual da rede de gás possível através de mistura H₂-GN-Biogás
- Aumento da eficiência energética através do Célula de combustível em CHP.

No que diz respeito à edificação, há um grande potencial no uso do hidrogênio. Um estudo de linha de base indica que, se continuarmos a fazer o que fazemos hoje, o hidrogênio e o biogás podem ser usados como opções para edifícios existentes sem grandes medidas adicionais, incluindo aquecimento e produção de eletricidade.

No entanto, se pensarmos em um horizonte um pouco maior, veremos que outras soluções de energia podem ser usadas em conjunto com a edificação, incluindo o transporte. O hidrogênio e o biogás são as principais opções nesse caso.

Esses combustíveis podem ser usados em conjunto com bombas de calor para substituir a calefação convencional por combustíveis líquidos, gasosos ou sólidos por meio da eletrificação. O hidrogênio também pode substituir os equipamentos convencionais. Na Alemanha, por exemplo, o hidrogênio já está sendo introduzido na rede de gás por meio de uma mistura de biogás com gás natural e hidrogênio.

Outra opção é aumentar a eficiência energética por meio de células de combustível em cogeração, que é uma solução mais avançada que a bomba de calor. Todas essas opções têm custos mais elevados, mas podem ser acompanhadas por um momento importante de aquisição dos equipamentos.

Em um momento intermediário, pode-se usar o hidrogênio em equipamentos convencionais, enquanto na ponta, a célula de combustível em cogeração pode ser utilizada para produzir eletricidade para a bomba de calor, aproveitando os rejeitos térmicos.

No Brasil, infelizmente, a eficiência energética em edificação ainda é pouco regulamentada. Isso é uma oportunidade perdida, já que o uso excessivo de ar-condicionado pode gerar um grande gasto de energia.

Algumas iniciativas brasileiras, como o Selo Casa Azul da Caixa Econômica, tentam resolver esses problemas mais importantes. Seria importante também regulamentar um "Habite-se" energético/conforto para garantir a habitabilidade das edificações.



Figura 137: Eficiência energética em edificação (PBE Edifica: Programa PROCEL Edifica).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem é uma iniciativa que já existe atualmente no Brasil. Ele é similar aos procedimentos de etiquetagem que existem para equipamentos, automóveis, aquecedores, entre outros. O programa se aplica a residências unifamiliares, multifamiliares e espaços comuns em geral.

O objetivo do programa é informar ao consumidor sobre a eficiência energética da edificação, por meio de uma classificação com selos de A a E, sendo A o mais eficiente e E o menos eficiente. Assim, o consumidor pode fazer uma escolha mais consciente e economizar energia. Porém, é importante que o programa seja expandido e mais efetivo para promover a eficiência energética em edificações no Brasil.

O Programa Brasileiro de Etiquetagem é uma metodologia usada no Brasil para avaliar a eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas, ou residenciais

No Brasil, há um aumento significativo no número de aparelhos elétricos nas casas das pessoas, como televisores, geladeiras e ar-condicionado. Esse último é um fenômeno das últimas décadas e vem se tornando cada vez mais comum nas residências brasileiras.

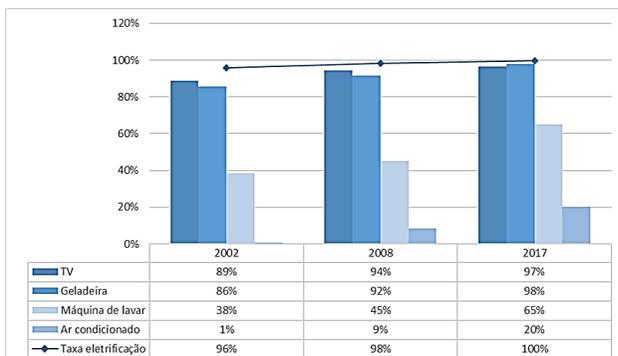


Figura 138: Número de aparelhos elétricos. Fonte: ftp://ftp.ibge.gov.br/Orcamentos_Familiares/Pesquisa_de_Orcamentos_Familiares_2008_2009/Perfil_das_Despesas_no_Brasil/tabelas_pdf/tab_1_02.pdf (2017).

Atualmente, estima-se que apenas 20% das casas possuam ar-condicionado, o que significa que há um grande espaço para crescimento. Isso se traduz em uma grande demanda elétrica nas residências, que pode chegar a 100% quando todos os lares possuírem o aparelho.

A seguir, temos um dado preocupante: a presença de utensílios domésticos nas casas brasileiras em função da renda.

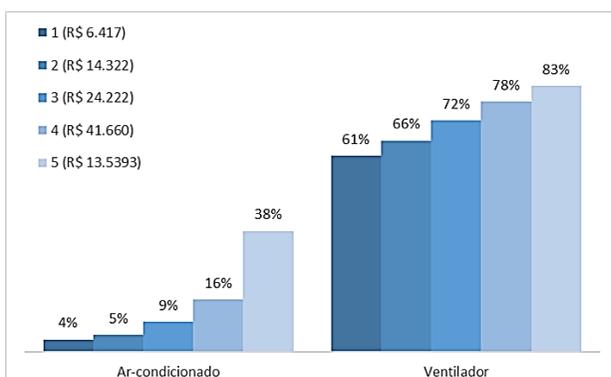


Figura 139: Presença de utensílios domésticos nas casas brasileiras em função da renda. Fonte: ftp://ftp.ibge.gov.br/Orcamentos_Familiares/Pesquisa_de_Orcamentos_Familiares_2008_2009/Perfil_das_Despesas_no_Brasil/tabelas_pdf/tab_1_02.pdf (2017).

Não é surpresa que o ar-condicionado esteja presente em lares com rendas superiores a R\$3.000,00 (valores de 2017), enquanto em famílias com baixa renda, a presença desse equipamento é menor.

Em compensação, há maior presença de ventiladores, que são equipamentos mais baratos. Porém, eles não desempenham a mesma função que o ar-condicionado. Enquanto o ventilador aumenta a taxa de troca de ar, agindo sobre o conforto e proporcionando uma sensação agradável, não é um parâmetro objetivo de conforto térmico.

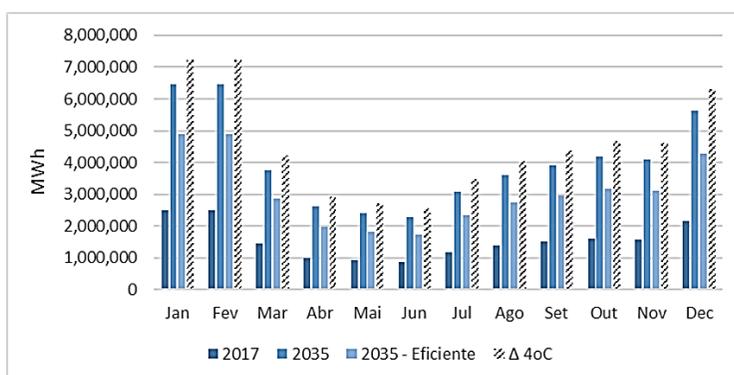


Figura 140: Consumo de energia elétrica em edificações. Fonte: ftp://ftp.ibge.gov.br/Orcamentos_Familiares/Pesquisa_de_Orcamentos_Familiares_2008_2009/Perfil_das_Despesas_no_Brasil/tabelas_pdf/tab_1_02.pdf (2017).

No que diz respeito ao consumo de energia elétrica em edificações, é importante destacar que há uma sazonalidade bastante marcante. Isso ocorre porque a demanda por energia é maior no verão, época em que o uso de equipamentos de refrigeração, como o ar-condicionado, é mais intenso.

Não é necessário apresentar um gráfico para constatar essa realidade, pois ela é bastante óbvia. É importante que as soluções de eficiência energética levem em conta essa sazonalidade, a fim de promover a redução do consumo de energia elétrica de forma mais eficaz.

Sobre a demanda energética de calor em edificações, é um assunto muito importante em regiões mais frias do Brasil, como a região sul e sudeste. Nessas regiões, os invernos são bastante rigorosos, e muitas

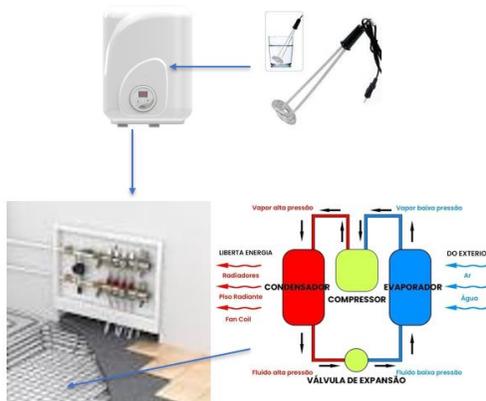
edificações não estão preparadas para lidar com essas condições climáticas.

Na região sul, as soluções mais comuns para lidar com a demanda de calor incluem o uso de ventiladores que funcionam com resistências, radiadores elétricos e a circulação de água quente em radiadores de parede. No entanto, essas soluções são ineficientes e muitas vezes incômodas, além de serem caras em alguns casos.

Por outro lado, a região sul também é conhecida por utilizar lareiras e queimadores de lenha ou tablet, que são soluções mais inteligentes e eficientes para gerar calor em edificações. Outra opção de luxo é o piso radiante, que consiste em uma instalação elétrica com resistências ou uma instalação que circula água quente entre o contrapiso e o piso.

É importante destacar que a demanda de calor nas edificações pode ter implicações significativas no consumo de energia elétrica, especialmente em regiões mais frias do Brasil. Portanto, é importante buscar soluções mais eficientes e sustentáveis para lidar com essa demanda, como o uso de tecnologias baseadas em Hidrogênio Verde.

Se utilizarmos energia elétrica, podemos aquecer todos os equipamentos mencionados anteriormente. Os radiadores pequenos, inclusive, podem aquecer a água.



Bomba de calor

Figura 141: Bomba de calor. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

No entanto, o ar-condicionado é o equipamento que funcionará melhor, pois ele se beneficia do coeficiente de performance. Ele não queima energia, ele apenas transporta energia de um lugar com maior energia para um lugar com menor energia. É possível usar eletricidade para fazer funcionar todos esses equipamentos.

Também é possível fazer os aquecedores de água funcionarem com eletricidade, utilizado para aquecer líquidos. A água quente pode circular por meio de um aquecedor elétrico ou por meio de uma bomba de calor. A bomba de calor captura a energia do exterior e a transfere para o outro lado, que pode ser um radiador, um piso radiante ou um trocador de calor convencional.

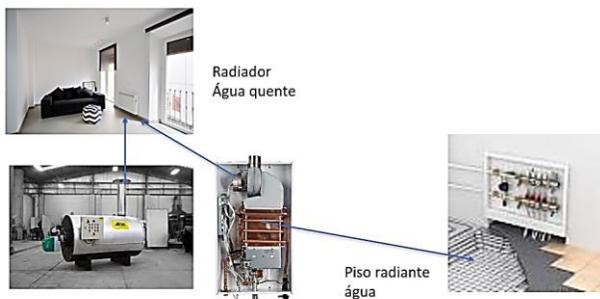


Figura 142: Radiador de Água quente. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Ao pensar em fontes energéticas para aquecimento, temos opções elétricas e não elétricas. No caso das fontes elétricas, é possível utilizar equipamentos como radiadores elétricos, que consomem energia elétrica para gerar calor.

Outra opção é o uso de bombas de calor, que são equipamentos capazes de capturar calor do ambiente externo e transferir para o ambiente interno, seja por meio de radiadores, piso radiante ou trocadores de calor convencionais.

No entanto, quando se trata de fontes não elétricas, como gás natural, gás liquefeito de petróleo, diesel e até biogás, é necessário utilizar equipamentos que queimem esses combustíveis para gerar calor.

Pode ser um equipamento de porte maior, como uma caldeira, ou um aquecedor de passagem, que aquece a água sob demanda.

Independentemente do equipamento escolhido, o calor gerado pode ser distribuído para o ambiente interno por meio de um sistema de distribuição, como radiadores ou piso radiante.

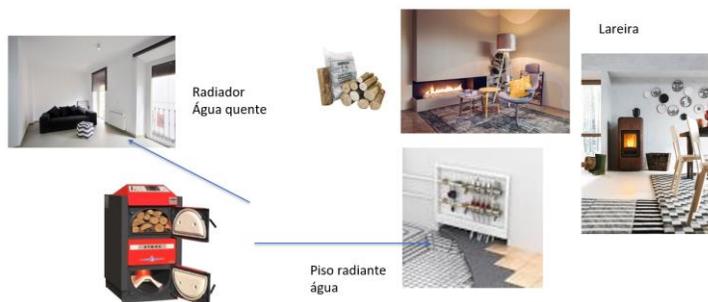


Figura 143: Radiador de Água quente. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Os aquecedores a lenha (biomassa) podem aquecer a água e distribuir o calor para os radiadores e piso radiante. Porém, é importante lembrar que a maioria das lareiras são mal dimensionadas, mesmo que sejam bonitas. A utilização da lenha deve ser feita em equipamentos adequados e dimensionados corretamente para garantir a eficiência e segurança.

Para cada kWh necessário para aquecer um edifício, quanto pagamos por ele?

Fonte	R\$/kWh
Lenha	0,05
Pellet	0,12
GPL/GN	0,58
Diesel	0,51
<u>Bomba de calor</u>	0,36
<u>Eletricidade</u>	1,00

Figura 144: Custo de kWh em relação da fonte (Junho/2022 Sul do Brasil)

Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Com lenha, o custo é de R\$ 0,05/kWh. O Pellet é um pouco mais caro. Já com óleos, quando usamos diesel, o custo sobe para R\$ 0,50. Quando usamos eletricidade pura, o custo é de R\$ 1,00/kWh, que é o que pagamos na fatura.

No entanto, temos ganhos significativos com o uso da bomba de calor, que se beneficia de uma eficiência muito forte. Apresentamos uma comparação de custos em R\$ entre a eletricidade da bomba de calor e equipamentos elétricos convencionais. Existe uma grande vantagem ao usar a bomba de calor.

Então, a bomba de calor é melhor do que o equipamento 100% elétrico, melhor do que um equipamento a diesel, melhor do que outros combustíveis fósseis e perde apenas para os derivados de biomassa.

No entanto, os derivados de biomassa, lenha ou pellet, têm um problema grave de alimentação. Não são equipamentos automáticos. Não é uma solução tão interessante para uso doméstico principalmente.

A bomba de calor é muito melhor do que as outras. Só perde para a lenha em custo, sendo esta, um problema. Ou é necessário ter uma caldeira enorme ou fazer a reposição a cada 3 ou 4 horas e ainda ter um estoque de lenha.

Esse é o problema! Se você mora em um apartamento, onde você vai estocar lenha? Não é viável.

E o coletor solar? O coletor solar térmico precisa de muita acumulação e você precisaria de um sistema muito grande. É interessante principalmente para água de consumo.

Mas, quando vamos para aquecimento, o tamanho do sistema fica muito grande. Assim, vale mais a pena colocar um sistema fotovoltaico que alimenta uma bomba de calor, gerando eletricidade, do que fazer o mesmo com um coletor externo.

Hoje, a energia fotovoltaica é mais viável do que os sistemas de aquecimento térmico. Eles são complexos, exigem muita área e principalmente muita acumulação. Resumindo, é aí que a fotovoltaica ganhou terreno. Ao sair da acumulação de baterias em residências, foi para a geração distribuída.

Os engenheiros entenderam que a eletricidade sempre ganha. Sistemas predominantemente elétricos são melhores do que sistemas

térmicos. É a natureza da eletricidade. A eletricidade é trabalho, enquanto o calor é degradação, por definição.

Na área de eficiência energética de edifícios, uma tendência interessante é a implementação de sistemas distritais, especialmente na Europa e no Japão. O sistema distrital consiste na distribuição de serviços de resfriamento, aquecimento e energia para edifícios e condomínios em uma escala de bairro, com o objetivo de aumentar a eficiência energética e a utilização de fontes renováveis.

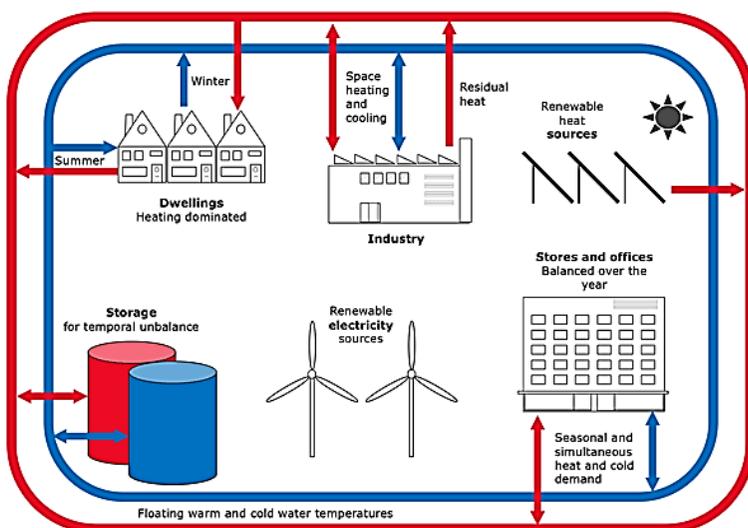


Figura 145: Sistemas energéticos distritais (Europa). Fonte:

<https://www.smartcitiesdrive.com/ex/sustainablecitiescollective/how-cities-can-develop-smarter-district-energy-and-microgrids/153461/>

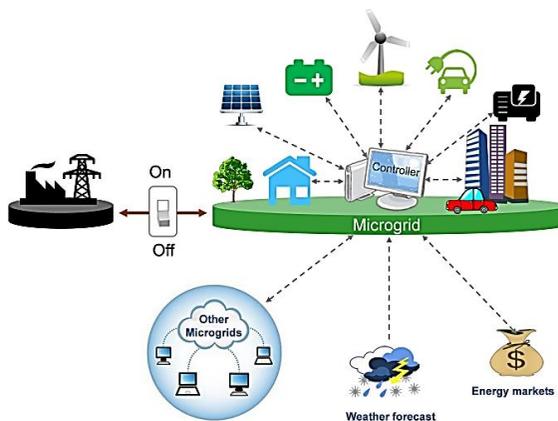
Em vez de cada edifício ter sua própria central de energia, um grande centro de produção de energia é usado para fornecer eletricidade renovável a uma rede de edifícios. Dessa forma, os edifícios são abastecidos por uma central de água fria de grande porte, que utiliza fontes renováveis para produzir a água fria circulante. Essa é a ideia dos serviços distritais.

Os sistemas distritais são uma solução interessante para melhorar a eficiência energética e reduzir custos. No entanto, existem desafios a serem superados na implementação desses sistemas, como a definição do diâmetro adequado das canalizações, que deve ser

equilibrado entre o custo da canalização e o consumo de energia para o bombeamento.

A implementação de sistemas distritais é uma tendência crescente na Europa e pode ser uma solução interessante para melhorar a eficiência energética de edifícios e condomínios em uma escala de bairro.

A ideia de sistemas distritais está relacionada à criação de pequenos anéis de energia e insumos para melhorar a eficiência. Na Europa, esses sistemas já são difundidos e são utilizados para fornecer serviços de resfriamento, aquecimento e energia para edifícios, condomínios e bairros. O conceito é baseado em trocas de energia entre sistemas azuis (frios) e vermelhos (quentes), com o uso de fontes renováveis e armazenamento para lidar com os problemas sazonais, principalmente em regiões com invernos e verões intensos.



Copyright Berkeley Lab

Figura 146: **Sistemas de energia distritais e micro-rede.**

Fonte: <https://nsci.ca/2019/11/08/microgrids-what-are-they-and-how-do-they-work/>

Junto aos sistemas distritais, temos a ideia de microrredes, que combinam não só a eletricidade, mas também outros serviços. Nesse conceito, o produtor e o consumidor de energia estão conectados em rede, saindo do modelo convencional de geração elétrica centralizada.

Com as microrredes, é possível ter geradores em casa que abastecem tanto a eletricidade quanto o calor, utilizando a rede interna pequena

para complementar o que falta ou excede. Isso envolve tanto a eletricidade quanto os usos do calor em geral.

Apesar dos benefícios, a tecnologia solar térmica enfrenta um desafio relacionado à sua difusão no mercado. A fabricação de painéis solares fotovoltaicos é dominada por poucos países e empresas, o que influencia a política de venda e mercado. Já a tecnologia dos painéis térmicos é difusa e, por isso, não recebe o mesmo investimento e lobby que a tecnologia fotovoltaica, embora possa ser feita até mesmo com materiais simples, como garrafas PET.

Em resumo, os sistemas distritais e as microrredes são alternativas para a geração de energia mais eficiente e sustentável, permitindo que os consumidores produzam e consumam a própria energia. Porém, é importante considerar os desafios envolvidos na difusão de tecnologias menos concentradas em poucos países e empresas.

Ao trabalhar com energias distritais, é preciso utilizar diversos componentes para produzir e consumir energia. Como o sistema é um "prosumidor", ou seja, você precisa produzir e consumir, é necessário ter fontes de energia, tais como fotovoltaicos, energia solar térmica, biogás, entre outras.



Figura 147: Componentes para a construção e sistemas energéticos distritais. Fonte: Roßmann, M., *Innovative Anlagentechnik im Neubau und Bestand*, 2020.

Para transformar essas fontes de energia em potência, é possível utilizar bombas de calor, sistemas mecânicos-térmicos de aquecimento, caldeiras de biomassa, hidrogênio, entre outros.

No Brasil, ainda não é comum o armazenamento de gelo, um método interessante para acumular energia no inverno e transformá-la em água ou resfriamento durante um período de degelo. Além disso, como consumidores, podemos utilizar eletricidade para carros com baterias, aquecimentos em geral e aquecimento térmico com diferentes tipos de gases. Esse é um panorama geral dos componentes necessários para trabalhar com energias distritais.

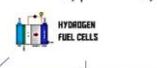
Em relação aos sistemas de energia distrital, é importante destacar os componentes necessários para o seu funcionamento. Para produzir e consumir energia, é preciso utilizar fontes renováveis, como energia fotovoltaica, solar térmica e biogás, que, misturadas, podem gerar gás para ser transformado em potência, trabalhar com bombas de calor, sistemas mecânicos-térmicos de aquecimento, hidrogênio e caldeiras de biomassa. É possível, ainda, utilizar o armazenamento de gelo como um recurso para acumular energia durante o inverno e transformá-la em água ou em frio durante o período de degelo.

Quando se trata do consumo de energia, a eletrificação é uma opção viável. Trata-se de transformar equipamentos que utilizam combustíveis fósseis, como gás natural e GLP, em equipamentos elétricos.

Eletrificação

O processo de alimentação por energia elétrica

A partir de combustíveis fósseis (GN, GLP)



+ Calor
= COGERAÇÃO

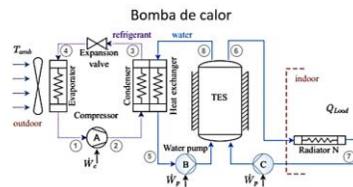


Figura 148: Eletrificação a partir de combustíveis fósseis. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Nesse contexto, o chuveiro elétrico é um exemplo de produto nacional, muito utilizado no Brasil. Se a energia utilizada for proveniente de fontes renováveis, o uso do chuveiro elétrico pode ser

considerado uma boa opção. No entanto, se a matriz elétrica for baseada em fontes fósseis, esse tipo de equipamento não é recomendado.

Uma alternativa mais eficiente é a bomba de calor, que utiliza a energia do meio ambiente para transportá-la de um lugar para outro, utilizando trabalho para jogar essa energia onde se deseja. A energia é transportada por meio de um acumulador de energia térmica. Para isso, é necessário utilizar eletricidade, mas se essa energia for proveniente de fontes renováveis, o uso da bomba de calor é perfeito.

A bomba de calor é três vezes mais eficiente do que o chuveiro elétrico, o que significa que ela utiliza menos energia para gerar calor. O chuveiro elétrico, por sua vez, utiliza energia elétrica nobre e a transforma em calor, o que é considerado um crime energético, já que a energia térmica é irreversível e não pode ser convertida novamente em energia elétrica.

5.1. Conceito de fornecimento descentralizado com hidrogênio

Agora que entendemos como a cogeração funciona e como pode ser alimentada com hidrogênio, surge a questão: como implementar isso na infraestrutura existente?

O hidrogênio precisa ser distribuído através da rede de gás natural. Para isso, podemos usar sistemas semelhantes aos de gás natural, mas adaptados para o hidrogênio. Além disso, podemos trabalhar com sistemas híbridos, como a combinação de bomba de calor com energia solar térmica, criando um grande "Lego" de soluções.

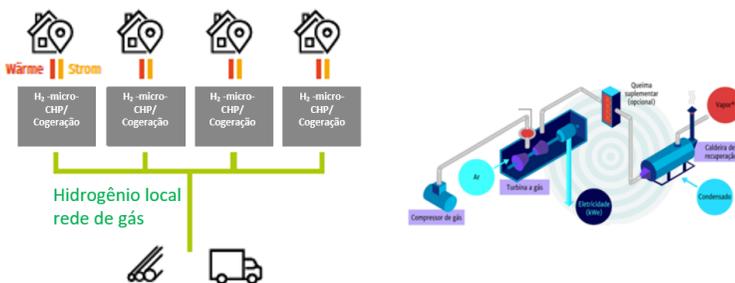


Figura 149: Conceito de fornecimento descentralizado com hidrogênio.

Fonte: Distrito de Düren, ofensiva de hidrogênio, 2021.

Outro ponto importante a ser considerado é o armazenamento sazonal, um problema muito comum na Europa, onde os invernos são muito fortes e os verões são muito quentes, com primavera e outono muito curtos. É possível aproveitar o que foi desperdiçado em uma estação para ser útil na estação oposta. A cogeração alimentada por hidrogênio é uma solução altamente eficiente em termos de aproveitamento energético que pode ajudar a superar esses desafios sazonais.

No contexto do Hidrogênio Verde, existem diversas formas de fornecimento do gás para produzir energia. Isso pode ser feito por cilindros ou por meio de gasodutos para redes de distribuição conectadas a sistemas fotovoltaicos, criando uma espécie de "Lego" de soluções disponíveis na vizinhança. O hidrogênio pode ser usado para gerar calor, eletricidade e até mesmo frio.

O que é interessante no uso do hidrogênio é que já existe uma infraestrutura de componentes que pode ser aproveitada. Claro que serão necessárias adaptações, mas são viáveis e não requerem um grande esforço. Além disso, existe a célula a combustível, que é uma novidade no setor de energia.

É importante lembrar que tanto as arquiteturas centralizadas quanto as descentralizadas são possíveis na produção de energia com hidrogênio. Dessa forma, não é necessário depender exclusivamente de uma estrutura centralizada para ter acesso aos benefícios do Hidrogênio Verde.

5.2. Mistura de H₂ na rede de gás

Na questão de como fazer o hidrogênio chegar às casas das pessoas, a solução é através da rede de gás natural. Nas grandes cidades do Brasil, a rede de distribuição de gás canalizado é muito procurada e utilizada há bastante tempo. Outras cidades começaram a ter instalações mais recentemente, após a chegada de gasodutos nos anos 2000.

Para trazer energia renovável, a solução é passar por um processo de eletrólise para produzir hidrogênio e adicioná-lo à rede de gás natural.

No Brasil, já temos experiência com essa técnica, mas para produzir biometano.

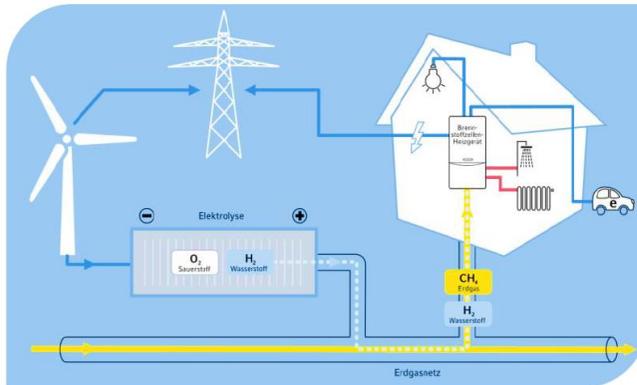
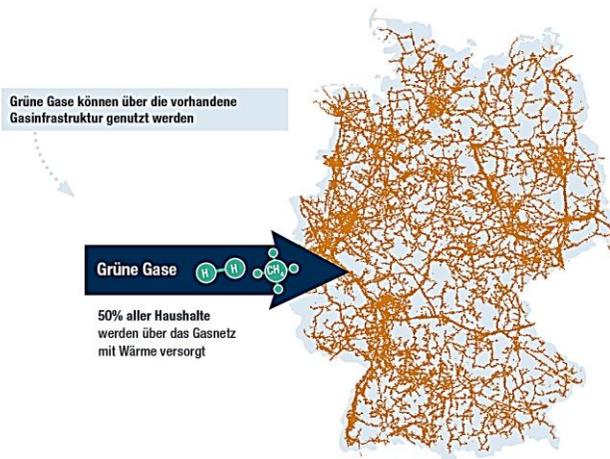


Figura 150: Mistura de H_2 na rede de gás. Fonte: Schaarschmidt, M., Die Brennstoffzellenheizung, 2019

Através de biorreatores que trabalham com orgânicos selecionados, é possível chegar a uma concentração de 70% a 73% de metano biogás. Após um processo de limpeza, desumidificação, sulfurização e concentração, o biometano chega a uma concentração de 97% de metano e pode ser injetado na rede de gás natural brasileira.

Essa mesma proporção pode ser utilizada para adicionar hidrogênio à rede de gás natural. Não se trata de hidrogênio puro na rede existente, mas sim de determinar a quantidade que a rede é capaz de tolerar de hidrogênio adicionado ao gás natural.

A rede de distribuição de gás natural da Alemanha é enorme e permeia todo o país. No país, há uma discussão sobre o limite de hidrogênio que pode ser adicionado à rede, atualmente limitado a 10% em volume.



- A mistura de gases verdes já é praticada em redes de distribuição na Alemanha;
- Mistura ainda limitada a 10% de H₂ por volume (Alemanha);
- Pesquisa para 20%.

Figura 151: Rede de mistura de gases verdes na Alemanha. Fonte: Site do DVGW: 2021-10-28 - Início da mistura de H₂ em redes de gás

Pesquisas estão sendo realizadas para aumentar esse limite para 20%, mas isso envolve muitas questões de segurança, distribuição, bombeamento, ventilação e adaptação de equipamentos. Também é importante considerar a equivalência energética e a calibração dos medidores de gás para garantir uma medida precisa do consumo.

5.3. Tecnologias de fornecimento de hidrogênio para edifícios

Tecnologias para fornecimento de hidrogênio são difíceis, mas existem soluções em desenvolvimento.

A microgeração é uma opção interessante para produção descentralizada de energia elétrica e térmica. Esses sistemas são compostos por equipamentos menores que os utilizados em cogeração convencional, mas o princípio é o mesmo.

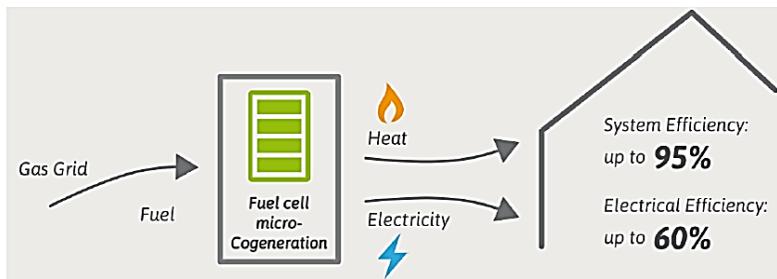


Figura 152: Sistemas de micro-CHP (microcogeração). Fonte: Sunfire, 2020

A cogeração por meio de células a combustível é extremamente eficiente, porém, é um sistema caro e pouco difundido. É possível fazer cogeração com motores de combustão interna convencionais ou motores estacionários adaptados, alimentados com qualquer combustível. O resultado é a produção de eletricidade e calor, assim como na turbina a gás.

Apesar de apresentar alta eficiência, esses sistemas são caros e, por isso, demandam subsídios para entrarem no mercado. Mesmo com a vantagem na qualidade e eficiência, é difícil convencer os consumidores a investirem em cogeração para suas casas, já que envolve alto custo. O uso de subsídios é fundamental para impulsionar a adoção desses sistemas, incentivando a pesquisa e a evolução dessas tecnologias.

Os sistemas de microcogeração são equipamentos pequenos que utilizam uma célula de combustível chamada SOFC, bastante flexível.

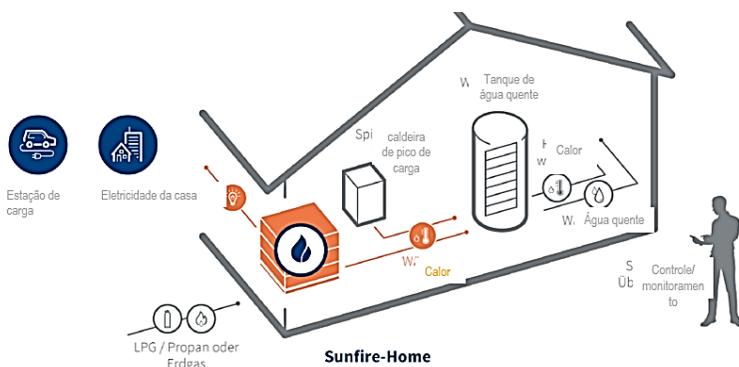


Figura 153: Sistemas de microcogeração. Fonte: Sunfire, 2020

Essas células podem trabalhar com combustíveis convencionais, como também com hidrogênio, o que as torna bastante versáteis. Esses sistemas são candidatos a substituir os sistemas antigos das redes e apresentam um custo interessante, sendo autossuficientes.

Existem equipamentos disponíveis no mercado para microcogeração com células de combustível.

Gesamtsysteme			Beistell-Lösungen		
Remeha eLecta 300 PEM-Brennstoffzelle (PEMFC) mit Speicher und 20 kW _{th} BW-Gerät el. Leistung: 750 W el. Wirkungsgrad: 38 % ca. 25.000 €	Sener Tec Dachs 0.8 PEM-Brennstoffzelle (PEMFC) mit Speicher und 20 kW _{th} BW-Gerät el. Leistung: 750 W el. Wirkungsgrad: 38 % ca. 29.000 €	Viessmann Vitocalor PTZ PEM-Brennstoffzelle (PEMFC) mit Speicher und 20 kW _{th} BW-Gerät el. Leistung: 750 W el. Wirkungsgrad: 38 % ca. 28.500 €	Viessmann Vitocalor PAZ PEM-Brennstoffzelle (PEMFC) el. Leistung: 750 W el. Wirkungsgrad: 38 % ca. 24.000 €	Solidpower (Buderus) Bluegen BG-15 SOFC-Brennstoffzelle el. Leistung: 500 W bis 1.500 W modulierbar el. Wirkungsgrad 55 % ca. 25.000 €	Sunfire Sunfire-Home 750 SOFC-Brennstoffzelle el. Leistung: 375 W bis 750 W el. Wirkungsgrad 36 % ca. 20.000 €

Figura 154: Visão geral do mercado FC micro-CHP (seleção). Fonte: Albus, R., Overview of fuel cell technologies in the low power range, 2021

No mercado europeu, mais especificamente na Alemanha, já existem sistemas disponíveis com células de combustível de troca de prótons e de óxido sólido. As potências elétricas desses sistemas variam de 375 W a 750 W. Vale destacar que as potências são baixas e o preço desses equipamentos pode ser elevado.

As tecnologias de cogeração com célula de combustível são bastante promissoras no contexto do Hidrogênio Verde. Temos algumas opções, como a PEM e a HT, mas a mais moderna e eficiente é a de óxido sólido, que está em destaque nas pesquisas atuais. É interessante compará-las com a turbina a gás, que não é a mesma coisa que turbina a gás natural.

Ao analisarmos a eficiência elétrica e térmica dessas tecnologias, podemos perceber que a cogeração tem como objetivo aproveitar o combustível tanto para gerar energia elétrica quanto térmica, buscando atender primeiro às necessidades elétricas e depois às térmicas, em uma lógica de paridade. Em grandes instalações industriais com alta demanda térmica, pode ser vantajoso atender

primeiro às necessidades térmicas e utilizar a eletricidade como um subproduto.

Ao analisar o gráfico, podemos perceber que a eficiência elétrica aumenta à medida que utilizamos as células de combustível, representadas pelas laranjas no gráfico. Com isso, a sobra térmica gerada é menor.

- SOFC
 - Alta eficiência
 - Modulares
- PEM
 - Até 4.000 ciclos de partida
- Turbina a gás
 - Alta capacidade
 - Baixa eficiência elétrica

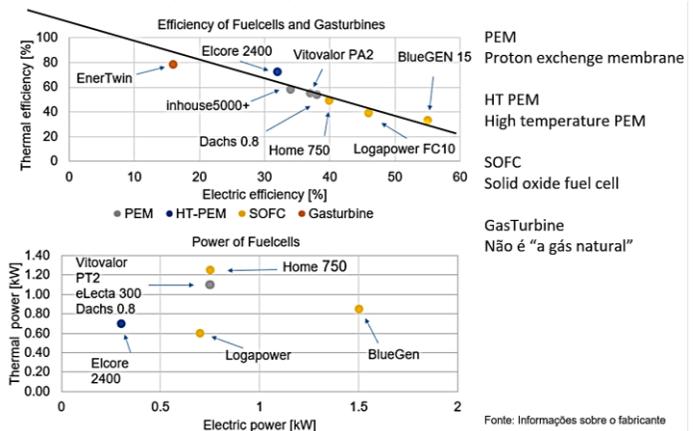


Figura 155: Eficiência elétrica da cogeração.

Já as turbinas, como a turbina a gás para geração de eletricidade, apresentam uma eficiência de conversão menor, o que faz com que a maior parte da energia gerada seja destinada para o calor. Esse gráfico é bastante útil para comparar diferentes tecnologias de cogeração e aproveitar ao máximo toda a energia do combustível utilizado.

A seguir, temos informações sobre o mercado em desenvolvimento das células de combustível para uso em edificações.

De acordo com os dados alemães apresentados, existe uma tendência de utilização de células de combustível em edifícios novos em construção, o que é uma iniciativa interessante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

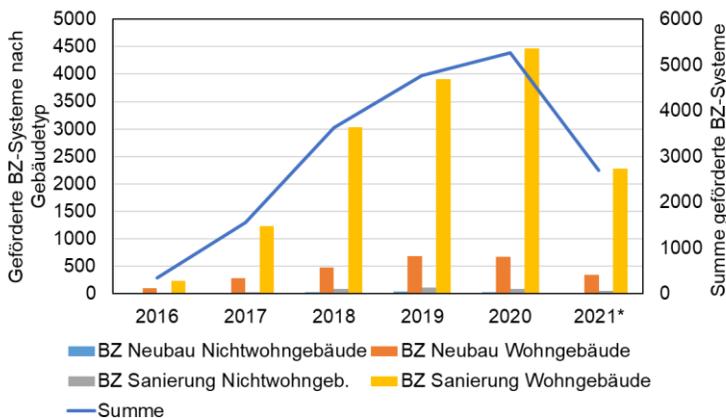


Figura 156: Desenvolvimento de mercado FC micro-CHP Alemanha. Aumentar o número total de sistemas de células de combustível financiados. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Além disso, há uma crescente utilização das células de combustível em aplicações residenciais, como retrofit, ou seja, em construções já existentes que são adaptadas para receberem a tecnologia.

É importante ressaltar que os dados apresentados são preliminares e foram coletados durante a pandemia, o que pode afetar a análise de tendências futuras. Contudo, a tendência de utilização de células de combustível em edificações é uma realidade em crescimento e merece atenção no mercado de Hidrogênio Verde.

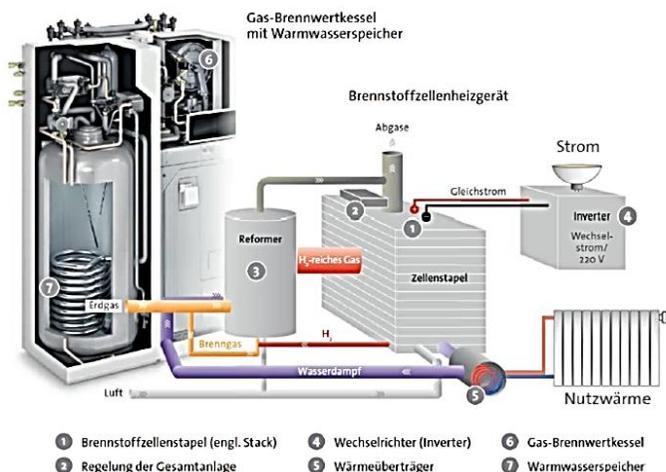


Figura 157: Aquecedor FC PEM com reforma externa de vapor a gás natural. Possibilidade de uso conjunto de FC PEM e caldeira de gás via reforma. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Vamos explicar como funciona a célula de combustível PEM convencional, que utiliza gás natural como combustível.

Primeiramente, é necessário realizar uma reforma a vapor do gás natural, que permitirá a obtenção do hidrogênio necessário para a célula de combustível. A partir disso, o hidrogênio é utilizado na célula de combustível, gerando energia elétrica e calor como subproduto.

Esse sistema é chamado de cogeração, pois utiliza todo o potencial energético do combustível, tanto para a geração de eletricidade quanto para o aquecimento. Em resumo, a célula de combustível funciona como um dispositivo que converte a energia química do hidrogênio em energia elétrica e calor.

Embora a tecnologia de células de combustível seja muito promissora, ela ainda apresenta alguns desafios. Um dos principais problemas é a degradação que ocorre ao longo do tempo, principalmente devido ao tipo de membrana utilizada. A membrana é uma parte fundamental da célula de combustível, responsável pela separação de íons e pela produção de energia elétrica.

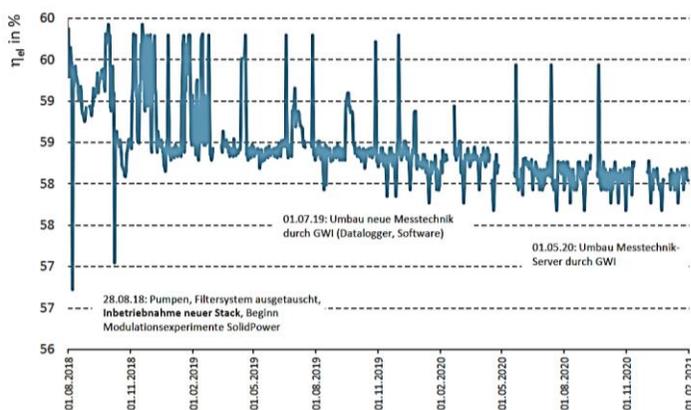


Figura 158: Desenvolvimento de tecnologia usando o BlueGEN. Fonte: Albus, R., Overview of fuel cell technologies in the low power range, 2021.

Portanto, a escolha do material da membrana é crucial para garantir a eficiência e a durabilidade da célula de combustível. A degradação pode reduzir a vida útil da célula de combustível e afetar sua eficiência energética. Por isso, os pesquisadores estão trabalhando em soluções

para aumentar a durabilidade das células de combustível e reduzir a degradação, como o desenvolvimento de novos materiais para as membranas.

Existem também possibilidades de reformar ou substituir aquecedores convencionais para uso de hidrogênio. Embora a literatura internacional se refira a eles como "caldeiras", o autor os chama de aquecedores.



- Os primeiros fabricantes têm no mercado produtos produzidos em massa que podem ser operados de forma flexível com conteúdo de 20-30 % H₂
- Os primeiros dispositivos para operação com 100% de H₂ estão em testes de campo

Figura 159: Dispositivos já disponíveis no mercado: caldeira (aquecedor). Fonte: H2-ready - WOLF Heiztechnik ; Caldeiras de hidrogênio (bdrthermeagroup.com)

Já há no mercado aquecedores que podem ser convertidos para uso de hidrogênio com mistura, e também existem aqueles que são 100% destinados ao hidrogênio. No entanto, o comportamento dos combustíveis é diferente, e há outros indicadores a serem considerados, além do poder calorífico, como a densidade de energia por produto e os números de conversão de equivalência.

Quando se trata de transferência de calor, o comportamento das chamas também é diferente para cada tipo de combustível. Por exemplo, quando se passa de um combustível sólido como lenha ou carvão para gás natural, a transferência de calor passa a ser dominada pela radiação térmica, e quando se passa para hidrogênio, essa radiação térmica é ainda menos relevante.

Isso significa que os equipamentos precisam ser projetados especificamente para lidar com o comportamento das chamas e a transferência de calor de cada tipo de combustível.

Substituir o combustível de uma usina térmica a carvão por hidrogênio, por exemplo, exigiria uma reforma tão grande que praticamente seria necessário trocar a fornalha inteira, o que pode custar milhões de dólares. No entanto, já existem soluções no mercado que podem ser utilizadas para o uso de hidrogênio, como os sistemas de cogeração, que embora sejam soluções caras, são eficientes. Há também um grande esforço tecnológico sendo feito para implementação dessas soluções.

6. Células de combustível: Visão geral do mercado

As células de combustível são uma realidade no mercado e já estão disponíveis para compra. Os valores por kW elétrico produzido são elevados e muitos investimentos ainda dependem de subsídios para se popularizarem.

Porém, há muitos agentes e melhorias sendo feitas para prolongar a vida útil desses dispositivos, o que é um desafio importante a ser superado. É uma tecnologia promissora que pode ser parte importante na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

	BlueGEN BG15 SOFC (0.5 - 1.5 kW _{el}) 25,000 € ; 600 €/a (16,666 €/kW _{el} 29,411 kW _{th})		Elcore 2400 HT-PEM (0.3 kW _{el}) 20,000 € ; 250 €/a (66,667 €/kW _{el} 28,571 €/kW _{th})
	Logapower FC10 SOFC (0.2 - 0.7 kW _{el}) 25,500 € ; 400 €/a (36,429 €/kW _{el} 42,500 €/kW _{th})		Dachs 0.8 PEM (0.75 kW _{el}) 24,348 € ; 240 €/a (32,464 €/kW _{el} 22,135 €/kW _{th})
	Home 750 SOFC (0.375 - 0.75 kW _{el}) 20,000 € ; 300 €/a (26,666 €/kW _{el} 16,666 €/kW _{th})		Vitovalor PA2 PEM (0.75 kW _{el}) 19,200 € ; 260 €/a (25,600 €/kW _{el} 17,455 €/kW _{th})
	EnerTwin Gas-Turbine (1.0 - 3.2 kW _{el}) 22,400€ ; 18 cufh 720€/a (4,000h/a) (7,000 €/kW _{el} 1,436 €/kW _{th})		eLecta 300 PEM (0.75 kW _{el}) 23,000 € ; 240 €/a (30,666 €/kW _{el} 20,909 €/kW _{th})
Temperature*	SOFC: 800-100 °C PEM: 80-100 °C HT-PEM: 160-180 °C		Inhouse 5000+ PEM (2.5 - 4.2 kW _{el}) 62,400 € ; 2,400 €/a (14,857 €/kW _{el} 8,320 €/kW _{th})

Figura 160: Células de combustível: Visão geral do mercado. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Vamos falar sobre um problema que o Brasil enfrenta com a introdução do hidrogênio: o frio. Para entender melhor, vamos analisar como funciona um sistema convencional de ar-condicionado.

Este é um sistema de ar condicionado normal

- Requer energia elétrica para comprimir o fluido de refrigeração

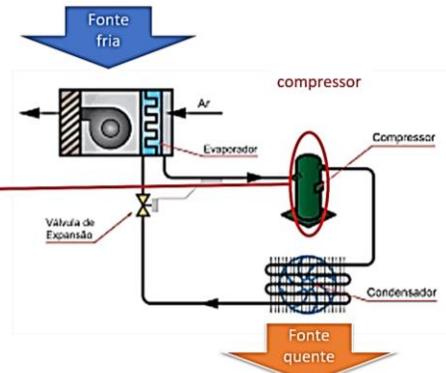


Figura 161: Sistema de ar condicionado. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Ele é composto por um condensador e um evaporador. O evaporador é responsável por retirar o calor do ambiente que se deseja resfriar, e para isso, um fluido refrigerante é circulado pelo sistema. Esse fluido é comprimido em alta pressão, passa pelo trocador de calor do evaporador e evapora, consumindo energia do ambiente e o resfriando.

Em seguida, o gás refrigerante é comprimido por um compressor, que é movido eletricamente, e então é condensado no condensador que fica fora da casa. O funcionamento do ar-condicionado depende de energia elétrica.

O sistema de ar-condicionado é eficiente porque consegue movimentar vários pacotes de energia de um ambiente mais frio para um ambiente mais quente, utilizando um pacote de energia elétrica para movimentar o compressor. Esse desempenho é medido pelo SCOP, que é o coeficiente de performance.

Em resumo, o ar-condicionado não cria energia, ele transporta energia de um lugar mais frio para um lugar mais quente à custa do trabalho realizado pelo compressor. No Brasil, é necessário ter eletricidade para que esse sistema funcione.

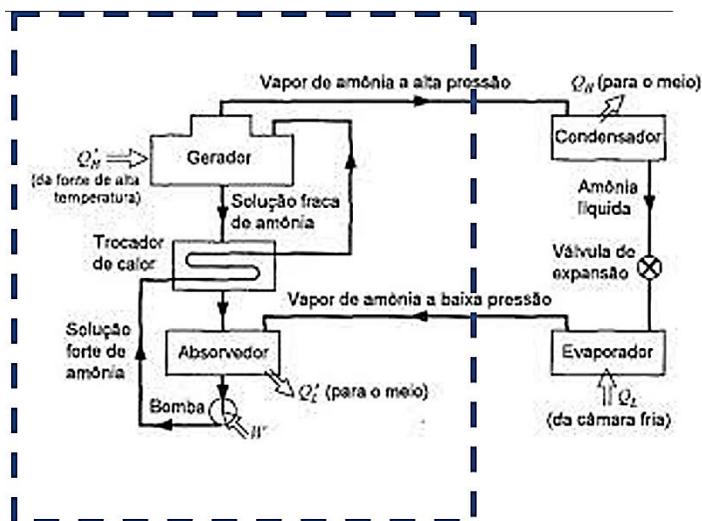


Figura 162: Ciclo de absorção. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Uma alternativa interessante para sistemas de refrigeração é o ciclo de absorção. Ele é diferente do ciclo de compressão convencional, pois não usa energia elétrica para comprimir o gás refrigerante. No ciclo de absorção, uma solução de brometo de lítio e água (ou água-amônia) é utilizada para separar as misturas por meio do calor. Uma das misturas vira um fluido refrigerante e a outra é guardada para ser reutilizada.

O grande benefício do ciclo de absorção é que, se a fonte de calor estiver disponível e de graça, ele pode ser muito eficiente. No entanto, se a fonte de calor precisar ser produzida, o ciclo de absorção pode ser pouco viável. Isso porque o coeficiente de performance (COP) do ciclo de absorção é, em média, de 1, ou seja, para cada unidade de energia elétrica utilizada, apenas uma unidade térmica é produzida.

Por outro lado, o COP do ciclo de compressão pode ser superior a 5, o que significa que ele pode transportar até cinco vezes mais energia térmica do que a energia elétrica que ele consome. Portanto, o ciclo de absorção é uma opção interessante quando a energia térmica está disponível de graça e seria desperdiçada de outra forma. As soluções mais tradicionais para o ciclo de absorção são brometo de lítio e água ou água/amônia.

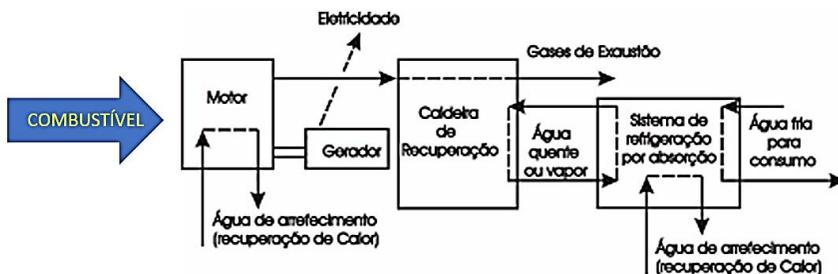


Figura 163: Cogeração. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Em um sistema de cogeração com ciclo de absorção, o processo funciona de forma similar a um motor de combustão interna. No entanto, em vez de utilizar apenas um combustível, é possível abastecê-lo com diversos tipos de combustíveis, incluindo o Hidrogênio Verde.

Nesse sistema, o ciclo de absorção é responsável por gerar energia elétrica e térmica de forma eficiente. Ele é composto por um gerador elétrico e um conjunto de equipamentos que permitem a produção de calor. Essa energia térmica pode ser utilizada para aquecer água, produzir vapor ou ar quente para aquecimento ambiental.

A energia elétrica é gerada a partir do processo de absorção, que utiliza uma mistura de soluções para absorver o vapor produzido pela queima do combustível. Esse processo gera uma pressão que é utilizada para movimentar o gerador elétrico, produzindo eletricidade.

Esse sistema é bastante eficiente, pois utiliza o calor gerado na combustão do combustível para produzir energia elétrica e térmica. Além disso, a utilização do Hidrogênio Verde como combustível torna o processo mais sustentável e menos poluente, contribuindo para a preservação do meio ambiente.

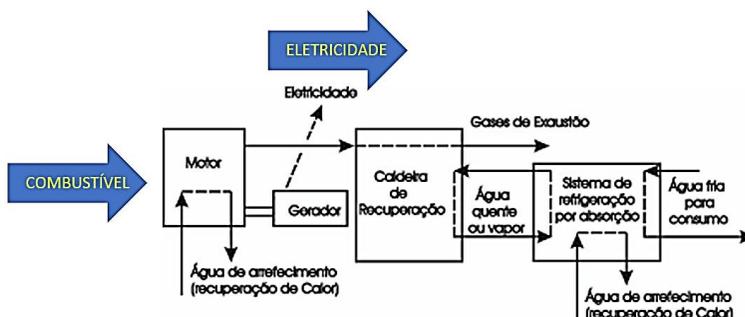


Figura 164: Cogeração. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Ao utilizar um ciclo de absorção em um sistema de cogeração, podemos abastecer um motor de combustão interna com diversos tipos de combustíveis, incluindo hidrogênio. É possível aproveitar a água de arrefecimento do motor como recuperação de calor, mas o objetivo principal é gerar eletricidade. A geração de energia elétrica é o motivo pelo qual todo esse processo é realizado.

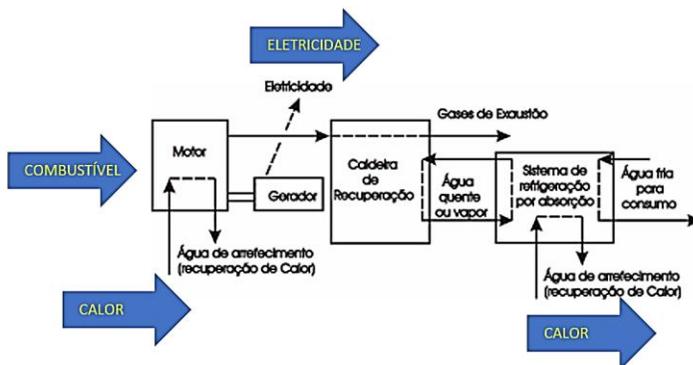


Figura 165: Cogeração. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

No processo de geração de eletricidade, é possível realizar a recuperação de calor em rejeitos térmicos gerados durante o processo. Essa é uma maneira de aproveitar a energia que seria perdida, aumentando a eficiência do sistema e reduzindo o desperdício de recursos. É importante ressaltar que essa recuperação de calor pode ser feita em diversos pontos do processo, e é uma prática comum em sistemas de cogeração e trigeração.

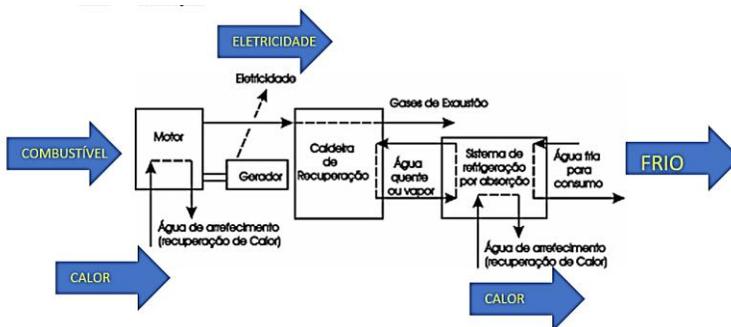


Figura 166: Cogeração. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A ideia aqui é utilizar o calor rejeitado pelo motor para produzir energia elétrica e também para produzir frio. Como isso é possível? Por meio de um processo de cogeração para fazer frio, onde uma caldeira de recuperação é utilizada para produzir água quente a partir do calor gerado pelo motor.

Essa água quente é então utilizada no circuito de absorção, onde produz frio que pode ser utilizado para refrigerar ambientes ou equipamentos. Dessa forma, é possível aproveitar o calor que seria desperdiçado pela descarga e transformá-lo em energia elétrica e frio útil.

No passado, as geladeiras funcionavam queimando lenha ou outros combustíveis para produzir frio, com baixa eficiência e alto consumo. Atualmente, a ideia é utilizar sistemas que aproveitem o calor que seria jogado fora, como as células de combustível.

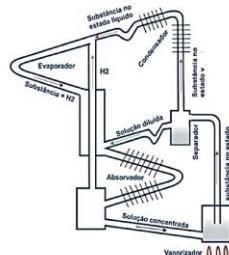


Figura 167: Ciclo de Absorção. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Essas células são eficientes na produção de eletricidade a partir do hidrogênio, mas também geram calor como subproduto. A ideia é aproveitar esse calor para produzir frio, por exemplo, em sistemas de refrigeração. No entanto, é importante ressaltar que essas tecnologias ainda são caras e não possuem grande escala de produção.

6.1. Produção e utilização descentralizada de hidrogênio

Um dos principais desafios na produção e utilização de energia renovável é a intermitência, ou seja, a variação da disponibilidade de fontes como o sol e o vento ao longo do tempo. Para lidar com esse problema, uma das soluções é a acumulação de energia em períodos de excesso de produção para uso em momentos de falta.

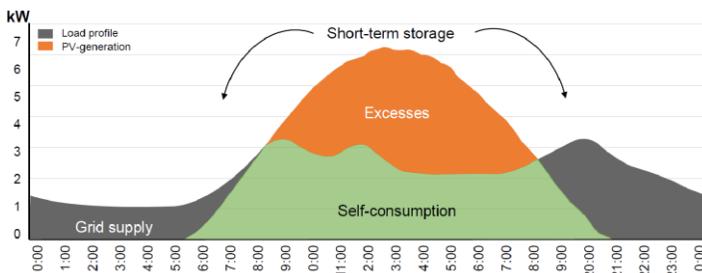


Figura 168: Conceito básico de armazenamento a curto prazo. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Nesse contexto, o Hidrogênio Verde tem se mostrado uma alternativa promissora, pois pode ser produzido a partir de energia renovável e armazenado em grandes quantidades.

Além disso, o hidrogênio pode ser utilizado de forma descentralizada, ou seja, em pequena escala, em sistemas de geração de energia distribuída, como em residências ou empresas. Nesses casos, o hidrogênio pode ser combinado com baterias para armazenamento de energia em curto prazo, proporcionando uma solução mais completa para a gestão da energia renovável.

É importante destacar que, embora o hidrogênio apresente vantagens como alternativa de armazenamento de energia, ainda é necessário avançar em tecnologias de produção e utilização para torná-lo mais eficiente e acessível. Entretanto, com o investimento em pesquisa e

desenvolvimento, o Hidrogênio Verde pode se tornar uma importante peça para a transição para uma matriz energética mais sustentável.

O hidrogênio pode desempenhar um papel importante na acumulação de energia, substituindo ou complementando as baterias para armazenamento de longo prazo. Para períodos curtos, as baterias são uma boa opção, mas para longos períodos o hidrogênio é mais eficiente, mais leve e pode acabar sendo mais barato.

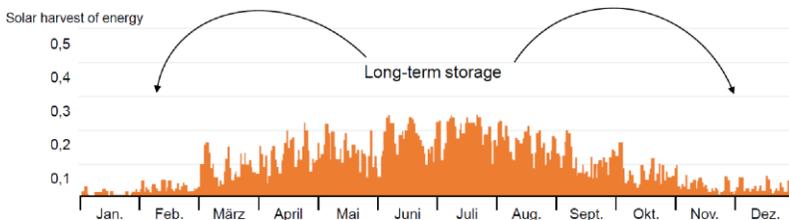


Figura 169: Conceito básica de armazenamento de longo prazo e sazonal.

Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Portanto, a produção e utilização descentralizada de hidrogênio pode ser uma solução interessante para lidar com as variações de oferta e demanda de energia ao longo do tempo.

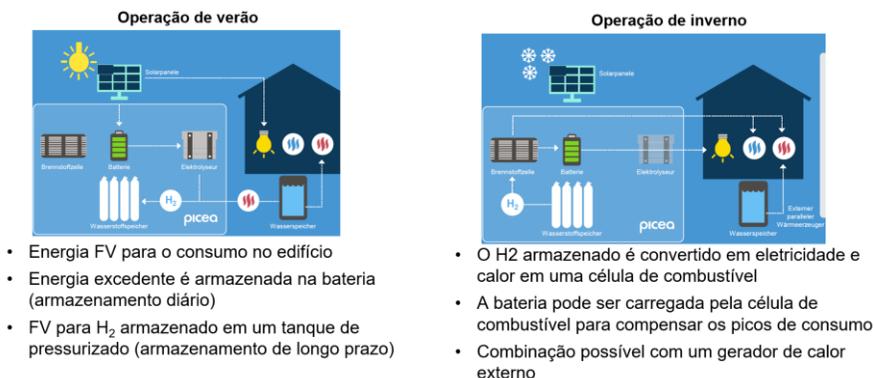


Figura 170: Armazenamento a longo prazo no edifício. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Aqui estão algumas composições muito utilizadas na Europa, especialmente para os tipos de residências europeias.

Se você tem painéis solares instalados em casa, pode utilizá-los para gerar energia elétrica para iluminação e para os equipamentos em geral.



- No verão, a FV abastece a casa + carrega baterias + produz hidrogênio.
- Com nuvens e à noite, a bateria é descarregada para fornecer energia
- No inverno, a FV fornece menor quantidade de eletricidade, a célula a hidrogênio produz calor e energia

Figura 171: Operação de painéis solares. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Além disso, você poderia usar uma célula de combustível para produzir hidrogênio. Esse hidrogênio seria armazenado para uso no inverno, quando há menos sol e a produção de energia elétrica pelos painéis solares é reduzida.

Essa solução é muito interessante, especialmente para o Brasil, que recebe bastante luz solar durante o ano. Dessa forma, você pode produzir uma quantidade significativa de hidrogênio no verão e utilizá-lo durante o inverno. Esse sistema é uma alternativa fantástica para o armazenamento de energia limpa e sustentável.

Existem opções de utilização de hidrogênio para o inverno e verão que podem ser produzidos através de um eletrolisador.

7. Fornecimento de energia às instalações industriais:

A indústria é um setor importante que consome grandes quantidades de energia e insumos para a produção de bens e serviços.

Diferentemente do setor de edificações, que é mais complexo de ser transformado, a indústria tem uma organização mais objetiva e efetiva para implementar ações em prol da sustentabilidade. Com o crescente aumento da indústria em nossa sociedade, torna-se cada vez mais importante pensar em alternativas energéticas limpas e eficientes, e o hidrogênio pode ser uma solução para isso.

A indústria necessita de um plano B, de redundância em seu fornecimento de energia e matéria-prima, para evitar interrupções em sua produção. Nesse sentido, o hidrogênio pode ser uma opção interessante para garantir a segurança energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Muitas dúvidas cercam a utilização do hidrogênio como fonte de energia. No entanto, ele tem sido convocado para integrar a matriz energética devido à necessidade urgente de uma alternativa mais sustentável. Uma das questões que surgem é como o hidrogênio será utilizado exatamente.

Uma das possibilidades é o fornecimento interno ou externo de hidrogênio para sites industriais. Isso significa que as indústrias poderão produzir o próprio hidrogênio ou comprá-lo de fornecedores externos para utilizá-lo como fonte de energia. Essa é uma das perguntas que estão sendo discutidas para que possamos ter respostas mais claras e precisas sobre a utilização do hidrogênio como fonte de energia.

Geração H ₂ no site (interno)	Fornecimento de H ₂ (externo)
Alta necessidade de espaço	Baixa necessidade de espaço no local
Prazo longo de implementação	Prazo curto de implementação
Alta segurança de abastecimento para eletrólise devido ao projeto modular da planta	Armazenamento e conexões redundantes de gasodutos aumentam a segurança do fornecimento
Oportunidades limitadas para a geração direta H ₂ com energia verde	Baixo custo de fornecimento H ₂ devido à concorrência

Figura 172: Geração e fornecimento de H₂. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Quando uma indústria considera a possibilidade de produzir hidrogênio, é preciso avaliar se é mais vantajoso ser o responsável pelo processo ou depender de fornecedores externos. O hidrogênio é uma matéria-prima importante em uma situação bem desenvolvida, sendo usado como insumo ou fonte de energia renovável.

Durante um período de transição, pode ser que o hidrogênio seja produzido a partir de fontes não renováveis, como o gás natural. É possível que essa situação se mantenha por um tempo até que a transição para fontes renováveis seja completa.

Se a indústria decidir produzir hidrogênio em seu próprio local, é preciso considerar que a produção demanda muito espaço, principalmente porque as fontes de energia renovável têm baixa densidade energética. Assim, pode ser mais vantajoso terceirizar o fornecimento.

Para isso, é necessário criar uma infraestrutura de transporte, o que pode levar tempo e custos elevados. A segurança no local de produção é uma preocupação importante, pois é necessário garantir a segurança dos funcionários e evitar acidentes. Ao investir em produção de hidrogênio, a indústria pode obter benefícios em termos de redução de custos, mas é preciso avaliar se a interiorização do processo é viável no curto e longo prazo.

7.1. Combustão de hidrogênio

Agora vamos abordar a técnica do hidrogênio, algo que provavelmente você já viu em outros livros, mas agora vamos trazer alguns números e informações importantes sobre o assunto.

Vamos falar sobre a comparação entre hidrogênio e metano durante o período de transição para fontes de energia renovável.

Propriedades H₂ x CH₄

O hidrogênio H₂ e o gás natural CH₄ têm diferentes propriedades relevantes para as aplicações

	Hidrogênio H ₂	Metano CH ₄
Densidade	0,0899 kg/Nm ³	0,7175 kg/Nm ³
Densidade volumétrica de energia	3,0 kWh/Nm ³	9,97 kWh/Nm ³
Densidade de energia gravimétrica	33,3 kWh/kg	13,8 kWh/kg
Poder calorífico inferior PCI	120,0 kJ/kg	50 kJ/kg
Poder calorífico superior PCS	143 MJ/kg	55,5 MJ/kg
	11,7 MJ/m ³	39,9 MJ/Nm ³
Índice de Wobbe inferior	Wi = 40,90 MJ/m ³	Wi = 48,17 MJ/m ³
Índice de Wobbe superior	Ws = 48,34 MJ/m ³	Ws = 53,45 MJ/m ³
Densidade relativa em relação ao ar	0.0695 0,56	

Figura 173: Propriedades H₂ x CH₄. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

O metano é um gás que está mais próximo da nossa realidade atual e podemos enxergar o hidrogênio como uma opção capaz de se beneficiar das estruturas e cultura existentes de utilização do metano, substituindo-o gradualmente. Para entender melhor essa comparação, é necessário avaliar as semelhanças e diferenças entre eles.

Antes de falarmos sobre a técnica de combustão de hidrogênio, é importante entendermos alguns conceitos básicos como a temperatura de Chama Adiabática e o Poder Calorífico. Para isso, podemos utilizar um diagrama que representa uma câmara de combustão que trabalha em um processo a pressão constante.

Temperatura Adiabática de Chama [°C] e Poder Calorífico [kJ/kg]

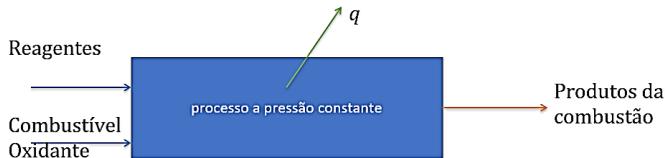


Figura 174: Temperatura Adiabática de Chama e Poder Calorífico. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Em processos químicos e de combustão, é essencial determinar as condições e identificar a condição como pressão constante. A pressão constante é uma idealização em que a entrada do reator contém os reagentes, constituídos por um combustível e ar atmosférico em toda a sua composição.

Esses reagentes passam por uma transformação dentro do reator, que ocorre em relação à pressão constante, ou seja, a pressão é maior na entrada e menor na saída. É importante ressaltar que a diferença de pressão não afeta o processo de combustão idealmente.

No outro lado da câmara, temos os produtos da combustão e a transferência de calor que pode ocorrer pela superfície do reator. É possível retirar calor do sistema, utilizando água como um fundo ou serpentina concêntrica ao redor do reator.

Temperatura Adiabática de Chama [°C]



$$\Delta H_R(T) = H_{prod}(T) - H_{reag}(T) = q$$

$$q = 0$$

$$H_{prod}(T_{CA}) = H_{reag}(T_1)$$

Figura 175: Temperatura Adiabática de Chama. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Imagine uma situação hipotética em que você consegue isolar completamente o reator, impedindo qualquer transferência de calor para o exterior. Isso fará com que toda a energia do processo de combustão seja concentrada entre os dutos de combustão, permitindo analisar a variação da entalpia da reação.

A entalpia é um parâmetro termodinâmico que expressa energia, sendo uma combinação da energia interna e do produto pressão e volume. Quando se fala em variação de entalpia, significa a diferença entre a entalpia do produto e a do reagente. O reagente possui uma entalpia intrínseca, enquanto o produto recebeu essa entalpia. A diferença entre as duas é o calor envolvido no processo.

Temperatura Adiabática de Chama [°C]

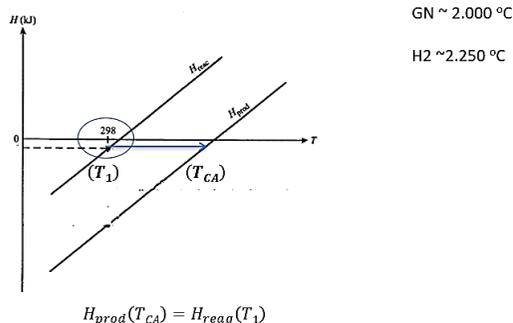


Figura 176: Temperatura Adiabática de Chama. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Imagine um reator de combustão onde a transferência de calor é isolada, ou seja, todo o calor gerado pela combustão fica concentrado entre dutos de combustão. Nesse cenário, é importante analisar a variação da entalpia da reação, que é um parâmetro termodinâmico que expressa energia. A entalpia de produto menos a entalpia do reagente gera a diferença, que é o calor gerado.

Se as entalpias de entrada e saída são iguais, não há troca de calor com o ambiente. A Temperatura de Chama Adiabática é o conceito em que toda a energia gerada na combustão é mantida no gás. O gráfico de entalpia por temperatura mostra a excursão da entalpia dos reagentes e dos produtos para um determinado componente. A temperatura ambiente, que é de 298K, é a referência para trabalhar em

termodinâmica, e as entalpias iguais resultam em uma temperatura correspondente do outro lado do gráfico.

O gás natural tem uma temperatura de chama adiabática de cerca de 2.000 °C, enquanto o hidrogênio é um pouco mais alto, cerca de 2.250 °C. A queima com ar atmosférico esquento o nitrogênio, o que diminui a temperatura em relação a uma combustão apenas com oxigênio, que teria uma temperatura de chama adiabática de até 4.000 °C.

Porém, esses valores são teóricos e dependentes do tipo de processo utilizado. A combustão com apenas oxigênio é mais cara, mas necessária em alguns processos que requerem alta energia e temperatura.

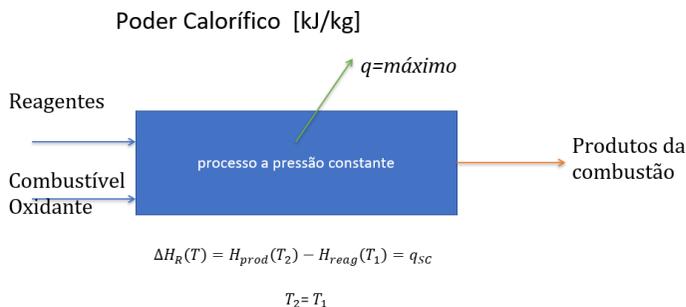


Figura 177: Poder Calorífico. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Vamos falar sobre outra situação hipotética para entendermos melhor as possibilidades e limites do processo de combustão. Imagine um reator que é capaz de retirar todo o calor gerado pelo processo de combustão, ou seja, que possui a capacidade de esgotar completamente a energia presente nos gases de combustão. Para que isso aconteça, é necessário que esse reator tenha uma superfície de troca infinita, ou seja, que enquanto os gases de combustão estiverem circulando pelo reator, ele seja capaz de retirar todo o calor possível.

Obviamente, essa é uma situação idealizada e praticamente impossível de ser alcançada na prática. Mas se conseguíssemos, a temperatura dos gases de entrada dos reagentes seria igual à temperatura dos gases de combustão, já que todo o calor teria sido retirado. Dessa forma, a temperatura de saída seria igual à

temperatura de entrada. Essa situação hipotética nos ajuda a entender os limites do processo de combustão e suas possibilidades.

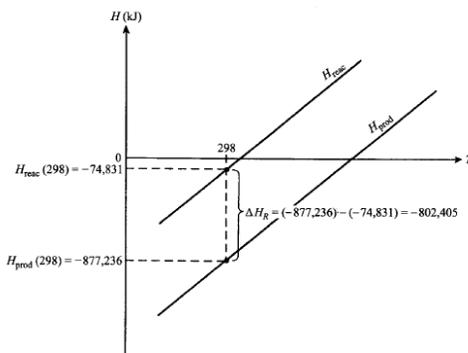


Figura 178: Poder Calorífico. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Nesse ponto, vamos falar sobre uma importante grandeza relacionada ao processo de combustão: o Poder Calorífico. Esse parâmetro é definido como a máxima quantidade de calor por unidade de massa que pode ser obtida a partir da queima de um combustível.

Por meio desse conceito, podemos calcular a quantidade de energia disponível em um determinado combustível e, assim, dimensionar a sua utilização em processos industriais.

No entanto, é importante destacar que o Poder Calorífico é uma idealização e não representa a quantidade de calor que pode ser efetivamente extraída do combustível, uma vez que há limitações práticas, como a necessidade de superfícies infinitas para retirar todo o calor disponível.

Vamos entender agora sobre os diferentes tipos de poder calorífico: superior e inferior. Primeiro, é importante lembrar que o poder calorífico é a quantidade máxima de calor por unidade de massa que pode ser obtida a partir de um combustível.

Quando se trabalha com um combustível hidrocarboneto, composto por uma quantidade X de carbono e Y de hidrogênio, além do oxigênio, que é o oxidante, é importante lembrar que ele também contém nitrogênio, uma parte do ar ambiente.

Na combustão desse combustível, o produto gerado é o gás carbônico, o vapor d'água e o nitrogênio, além de outros compostos, que podem ser produzidos dependendo da estequiometria da reação.

Para entendermos melhor, vamos imaginar que a temperatura de combustão é de 2.000°C. Nessa situação, o vapor d'água presente nos gases de combustão não estará em estado líquido, mas sim em fase vapor. À medida que a temperatura vai diminuindo, esses gases vão condensando e o vapor d'água retorna para o estado líquido, devolvendo energia adicional para o processo.

O poder calorífico superior é aquele em que é possível aproveitar toda a energia da condensação do vapor d'água. Já o poder calorífico inferior é aquele em que não é possível aproveitar essa energia, pois trabalha com temperaturas abaixo de 100°C em uma descarga, o que não é economicamente viável.

No caso do poder calorífico inferior, ainda existe o risco de formação de compostos que podem corroer o sistema. É por isso que, mesmo que não seja possível utilizar toda a energia disponível, é melhor não a utilizar para evitar problemas de manutenção.

Quando se negocia o gás natural, o contrato é feito em quantidade de energia, não em volume. A unidade utilizada é o milhão de BTU, que é uma medida de energia que leva em conta o poder calorífico superior.

No entanto, é importante lembrar que na maioria das aplicações, o poder calorífico inferior é utilizado. Mesmo assim, as empresas de gás natural cobram pelo poder calorífico superior, pois é a quantidade máxima de energia disponível no combustível.

	Hidrogênio H ₂	Metano CH ₄
Densidade	0,0899 kg/Nm ³	0,7175 kg/Nm ³
Densidade volumétrica de energia	3,0 kWh/Nm ³	9,97 kWh/Nm ³
Densidade de energia gravimétrica	33,3 kWh/kg	13,8 kWh/kg
Poder calorífico inferior PCI	120,0 kJ/kg	50 kJ/kg
Poder calorífico superior PCS	143 MJ/kg 11,7 MJ/Nm ³	55,5 MJ/kg 39,9 MJ/Nm ³
Índice inferior de Wobbe	Wi = 40,90 MJ/m ³	Wi = 48,17 MJ/m ³
Índice de Wobbe superior	Ws = 48,34 MJ/m ³	Ws = 53,45 MJ/m ³
Densidade relativa em relação ao ar	0,0695	0,56

Figura 179: Poder calorífico superior de H₂ e CH₄. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Vamos falar sobre o poder calorífico superior, que é uma referência importante para o gás natural e o metano. Em termos de energia por quilograma, o hidrogênio é três vezes mais energético do que o metano, o que é uma vantagem. Porém, em termos de volume, a situação se inverte, já que o hidrogênio é muito pouco denso, o que significa que é menos denso que o metano em ordens de grandeza.

Ao receber hidrogênio em canalização, é preciso levar em consideração a pressão e a temperatura ambiente. Essa temperatura ambiente pode ser de 0 °C, 15 °C, 20 °C ou 25 °C, e é importante saber qual é a referência utilizada. Isso pode prejudicar o hidrogênio quando comparado ao metano, mas também é um indicativo de que a transição das estruturas do metano para o hidrogênio é viável.

A diferença de poder calorífico superior entre o metano e o hidrogênio é de 1 para 4, o que significa que as vazões precisam ser ajustadas para equilibrar essa diferença.

$$W = \frac{PC}{\sqrt{\rho^*}} \quad \begin{array}{l} \rightarrow \text{Poder Calorífico Superior ou Inferior} \\ \rightarrow \text{Densidade relativa do combustível} \end{array}$$

Figura 180: Índice de Wobbe W [MJ/Nm³]. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Se dois gases combustíveis tiverem valor do índice de Wobbe similares a energia térmica libertada será a mesma. Toleram-se variações de até 5%.

Agora vamos falar sobre o índice de Wobbe, uma medida usada para indicar a intercambialidade de combustíveis gasosos. Essa medida é dada pela razão do poder calorífico, que pode ser tanto superior quanto inferior, sobre a densidade relativa do combustível. A densidade relativa é uma razão entre a densidade do combustível em relação à densidade do ar, que é o fluido gasoso de referência mais comum.

O índice de Wobbe é um número levantado experimentalmente em queimadores que possuem um orifício de passagem do queimador por uma diferença de pressão estabelecida para fazer o escoamento, e que possui condições muito bem controladas.

Esse número não serve para nada em si mesmo, mas ele é importante quando você quer substituir um combustível por outro gasoso, porque se os índices de Wobbe forem próximos (com uma diferença de até 5%), é possível fazer a substituição sem precisar fazer ajustes ou adaptações. Isso acontece porque os combustíveis, como gás natural e GLP, que têm índices de Wobbe muito próximos um do outro são muito parecidos.

No entanto, é importante lembrar que o índice de Wobbe não indica que é possível fazer a conversão de um combustível para outro de maneira simples, sem custo adicional ou esforços adicionais.

Por exemplo, o hidrogênio tem uma densidade muito baixa, o que faz com que o escoamento se faça de maneira diferente. Por isso, é preciso ter cuidado ao fazer a conversão e levar em consideração outros parâmetros importantes. O índice de Wobbe serve como uma informação útil para ajudar a antever problemas na substituição de combustíveis gasosos.

As vantagens do hidrogênio incluem:

- Como o metano, não é venenoso, (apenas asfixiante e explosivo);
- Tem uma temperatura de ignição espontânea de 650o C – precisa de uma faísca para acender;
- Limites de inflamabilidade amplos (3-70% H₂ em mistura de ar) — é mais fácil manter uma chama;
- Não emite CO₂, idealmente só vapor de água;
- Queima com uma velocidade de chama muito maior (300 cm/s) do que o metano (30 cm/s), estabilizando assim a chama.

As desvantagens incluem:

- Temperatura de chama adiabática pode aumentar formação de NO_x;
- Os amplos limites de inflamabilidade \boxtimes avaliações de segurança;
- O hidrogênio tem um Índice de Wobbe diferente do metano;
- Reatividade.

O hidrogênio tem exigência de ar de combustão diferente em comparação com o metano.



H₂ apresenta menor necessidade de oxigênio, mas: Massa específica (densidade) muito pequena, logo, grandes vazões.

Vamos falar um pouco mais sobre o hidrogênio. Ele tem muitas vantagens em relação a outros gases. Uma delas é que ele não é venenoso, ao contrário da amônia, que pode causar asfixia e morte em casos de acidentes. Além disso, o hidrogênio tem uma temperatura de ignição espontânea alta, a 650°C, o que é bom para evitar acidentes, já que ele não vai pegar fogo em temperaturas baixas. No entanto, é preciso cuidado para evitar faíscas, que podem causar a ignição do gás.

Outra vantagem do hidrogênio é que ele tem um amplo limite de inflamabilidade, o que significa que é possível manter uma chama mesmo com misturas fracas. Além disso, ele emite apenas vapor d'água quando queimado, o que é muito vantajoso do ponto de vista ambiental. O problema não está no uso do hidrogênio em si, mas sim no processo de produção, que pode emitir CO₂.

Outro parâmetro importante na combustão é a velocidade da chama, que é maior no hidrogênio do que no metano. Isso influencia no tamanho da câmara de combustão necessária para queimar determinada quantidade de gás. Porém, é importante mencionar as desvantagens do hidrogênio. Uma delas é que ele tem uma temperatura de chama mais alta, o que pode levar à produção de Nox, um composto cancerígeno e oxidante que precisa ser controlado.

Embora a diferença de temperatura entre o hidrogênio e outros gases não seja muito grande, ela pode ter um impacto significativo na produção de Nox. Para controlar a formação desse composto, é possível diluir o hidrogênio com mais água para diminuir a temperatura da chama.

Outra desvantagem do hidrogênio é que ele tem um índice de Wobbe diferente do metano, o que exige adaptação de equipamentos. Além disso, o hidrogênio é muito reativo e exige grandes vazões de gás, devido à sua massa específica baixa. Por isso, é importante entender bem as vantagens e desvantagens do hidrogênio antes de utilizá-lo como combustível.

Queimadores de hidrogênio para alta temperatura:

- Produção térmica de NO_x → compensação com circulação de gases de combustão;
- Composição diferente dos gases de combustão;

- Alto conteúdo de condensado;
- Transferência de calor alterada e liberação de calor (radiação);
- Flameback/flashback devido à maior velocidade das chamas.

Por outro lado, o hidrogênio também apresenta desvantagens. Ele tem um índice de Wobbe diferente do metano, o que significa que é necessário adaptar os equipamentos para utilizá-lo como combustível. Além disso, o hidrogênio é muito reativo e pode causar problemas de segurança.

Outro ponto importante é que, por ter uma velocidade de chama maior do que o metano, o hidrogênio pode causar retorno de chama em tubulações e instalações, o que é um risco que precisa ser considerado.

Uma questão importante que precisamos abordar é a possibilidade de misturar hidrogênio e gás natural. Isso é possível e pode ser vantajoso para fazer a transição para o uso de hidrogênio aproveitando a infraestrutura existente. No entanto, é preciso considerar as diferenças em densidade energética e índice de Wobbe, o que pode exigir adaptações na infraestrutura.

Por fim, é importante destacar que estamos em uma fronteira em relação ao uso do hidrogênio como combustível. Ainda há muito a ser descoberto em relação à produção, transporte e uso do hidrogênio, mas já temos experiências iniciais que podem ser usadas como referência. Como técnicos, estamos participando dessas soluções para viabilizar a transição para uma economia mais limpa e sustentável.

Por exemplo, as turbinas a gás, que foram projetadas para funcionar com gás natural, podem ser adaptadas para utilizar hidrogênio como combustível. No entanto, é necessário fazer algumas modificações para que a turbina possa trabalhar com uma mistura de hidrogênio e gás natural antes de poder operar com 100% de hidrogênio.



Figura 181: Aparelhos a gás natural podem não gostar muito de hidrogênio. **Os consumidores exigem o combustível certo para o funcionamento estável e a combustão.** Fonte: Notas de Aulas, 2023.

O mesmo acontece com os motores: é preciso levar em consideração as vazões e fazer algumas modificações para que possam funcionar com hidrogênio. Os queimadores industriais também precisarão ser modificados para funcionar com hidrogênio. Além disso, é preciso considerar questões de segurança, como o espectro visível, que é diferente para hidrogênio e gás natural.

Mesmo em equipamentos de uso doméstico, como bicos de gás em casa, o hidrogênio pode ser utilizado como combustível, mas será necessário fazer algumas modificações e levar em conta questões de segurança. Portanto, a transição para o uso de hidrogênio como combustível requer adaptações em diversos equipamentos, mas essas mudanças podem ser feitas de forma gradual e segura.

Nesse trecho, vamos falar sobre a possibilidade de uso de hidrogênio em algumas indústrias, como a de cimento, vidro e mineração.

Para começar, é importante entender que o hidrogênio pode ser misturado ao gás natural, em uma proporção de até 20%, e já existem sistemas de distribuição que suportam essa mistura. No entanto, é preciso avaliar se os aparelhos utilizados conseguem trabalhar com essa mistura.

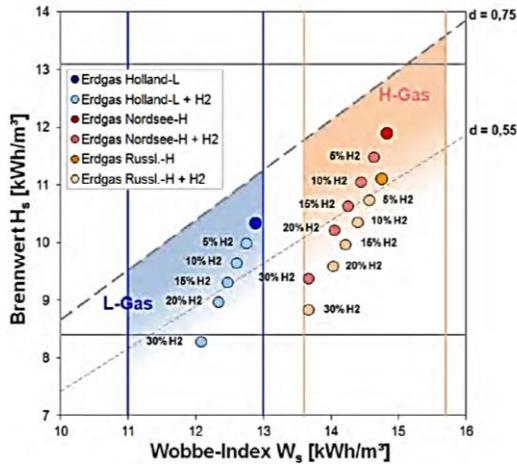


Figura 182: Influência da concentração de H₂ sobre a qualidade do gás.

Fonte: Notas de Aulas, 2023.

- DVGW-AB260 especifica limites com base no projeto de engenharia de gás dos componentes;
- Há restrições para a alimentação H₂ em relação a
- índice de Wobbe permitido;
- Valor calórico;
- Densidade relativa;
- Composição original do gás natural.

7.2. Indústria do cimento

Em relação à indústria do cimento, é uma indústria de grande porte e bastante intensiva. Além disso, ela tem um grande impacto ambiental, o que torna necessário avaliar cuidadosamente a viabilidade de introduzir o hidrogênio nesse setor.

Já na indústria do vidro, assim como na de cimento, são utilizados processos a alta temperatura. É possível introduzir o hidrogênio nesse setor, mas é preciso avaliar os impactos e as adaptações necessárias nos processos produtivos e nos equipamentos utilizados.

Por fim, a indústria de mineração, embora não seja tão intensiva em termos de processos produtivos, tem desafios logísticos importantes que podem ser beneficiados pelo uso de hidrogênio.

Em resumo, é possível utilizar o hidrogênio em diversas indústrias, mas é preciso avaliar cuidadosamente as implicações e adaptações necessárias em cada setor.

A indústria do cimento é uma indústria que está em constante crescimento e é fundamental para a construção civil. Ela é responsável por produzir o material base para construção de prédios, pontes, estradas e outros tipos de infraestrutura.

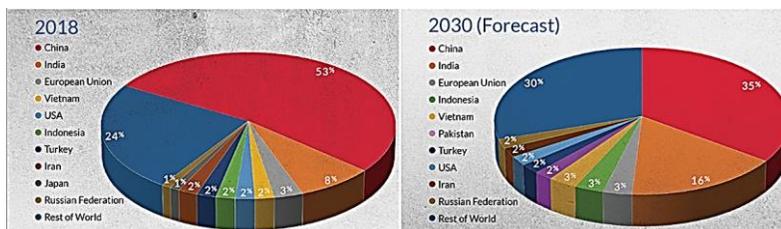


Figura 183: Produção de cimento em todo o mundo. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Não é necessário ir muito longe para perceber sua importância: basta ver que a China é um dos países que mais consome cimento no mundo, mas a Índia também vem crescendo rapidamente. Em geral, todos os países que estão em desenvolvimento são grandes consumidores de cimento.

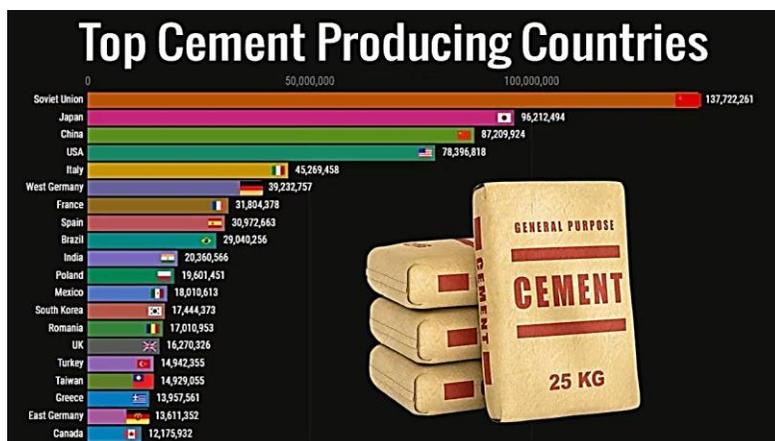


Figura 184: Os maiores produtores de cimento por país. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

O Brasil é um grande produtor de cimento, figurando entre os dez maiores do mundo. Apesar de não ser o líder como a China, o país possui uma indústria expressiva e em constante crescimento.

No Brasil, existem atualmente 91 fábricas de cimento, com uma produção significativa, apesar da capacidade ociosa. Isso significa que a indústria ainda tem capacidade para responder a um aumento de demanda. Entre os principais nomes do setor estão a Votorantim, a Camargo Corrêa e outras empresas.

Month	2020	2021
January	4,437,000	5,084,000
February	4,237,000	4,705,000
March	4,179,000	5,437,000
April	4,100,000	5,291,000
May	4,824,000	5,501,000
June	5,382,000	5,438,000
July	5,929,000	5,942,000
August	5,829,000	5,896,000
September	5,839,000	5,698,000
October	5,944,000	5,339,000
November	5,288,000	5,384,000
December	4,683,000	4,757,000
Total	60,210,000	64,472,000

Source: SNIC

- 91 fábricas
- produção instalada de 94 milhões de toneladas,
- capacidade ociosa de 31%,
- Votorantim Cimentos
- Camargo Corrêa InterCement Brasil
- 64,4 milhões de toneladas de cimento vendidas em 2021
- 6,6% a mais do que no ano anterior.

Figura 185: Vendas de cimento 2020-2021. Fonte: SNIC

Aqui é a localização das fábricas de cimento no Brasil. A região sul e sudeste do país são as que concentram a maior parte dessas fábricas.

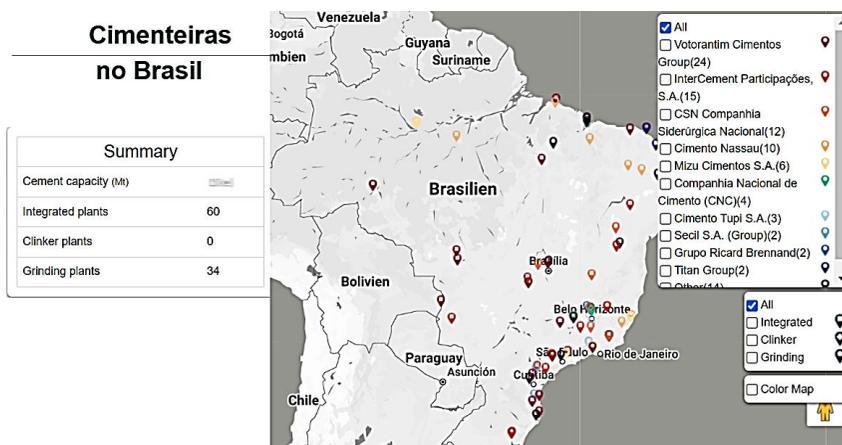


Figura 186: Cimenteiras no Brasil. Fonte: Google Maps

Nesta parte, vamos abordar o fluxograma de fabricação do cimento. É um processo linear que segue uma sequência de etapas que vão desde

a mistura até o armazenamento. As quatro etapas mais importantes do processo são: mistura, queima, moagem e armazenamento.

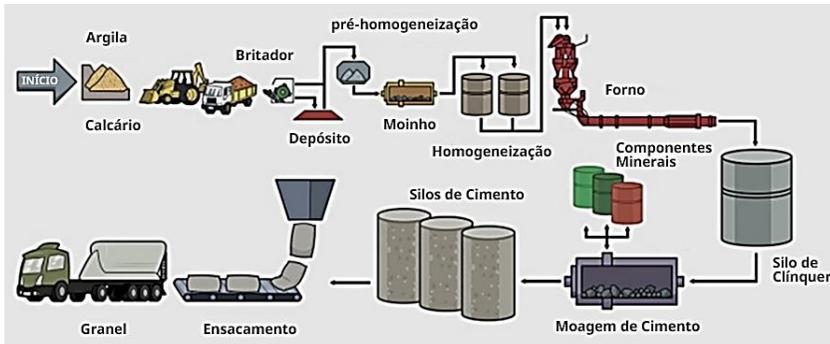


Figura 187: Fluxo da fabricação do cimento. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Na etapa de mistura, as matérias-primas são dosadas e misturadas em proporções adequadas. Em seguida, a mistura é encaminhada para a etapa de queima, onde ocorre a transformação dos materiais em clínquer, que é um produto intermediário do cimento.

Após a queima, o clínquer é moído em um moinho juntamente a outros materiais, como gesso e aditivos, na etapa de moagem. Por fim, o produto final é armazenado em silos até ser embalado e comercializado.

É importante destacar que o processo de fabricação do cimento é um dos principais emissores de gases de efeito estufa, devido ao uso intensivo de combustíveis fósseis na etapa de queima. Por isso, é importante buscar alternativas mais sustentáveis, como a utilização de fontes renováveis de energia, como o Hidrogênio Verde.

A etapa de mistura na fabricação de cimento é um processo mecânico que pode ser realizado tanto a seco quanto a úmido das matérias-primas. O processo começa com uma base de argila e é adicionado calcário. Existem processos mecânicos que levam à homogeneização da mistura, terminando no moinho. Essa é uma etapa fundamental para garantir a qualidade do cimento produzido.

O processo de fabricação do cimento envolve diversas etapas, sendo uma delas a mistura das matérias-primas. Essa mistura é realizada de forma mecânica, podendo ser seca ou úmida. A base da mistura é

composta por argila e calcário, que passam por processos mecânicos e homogeneização até chegar ao moinho.

Após a mistura, a matéria-prima é introduzida em um forno gigante, onde ocorre a combustão com aditivos, como carcaças de pneus e biomassa de agricultura familiar, que agregam componentes à mistura. Nesse processo, a matéria-prima desce pelo forno enquanto o gás de combustão sobe em contracorrente. A mistura é então agitada por um forno rotativo até formar o Clínquer.

O Clínquer é o resultado da combinação da matéria-prima com os aditivos utilizados na combustão. A composição do Clínquer é importante para garantir a qualidade do cimento produzido. A utilização de aditivos como carcaças de pneus e biomassa é uma forma de tornar o processo mais sustentável e aproveitar resíduos que seriam descartados.

É importante ressaltar que a produção de cimento é uma indústria pesada e que possui grande impacto ambiental. Por isso, a busca por soluções sustentáveis é fundamental para reduzir esses impactos e tornar a produção mais responsável. O uso de fontes de energia renovável, como o Hidrogênio Verde, pode ser uma alternativa interessante para tornar o processo de produção de cimento mais sustentável.

Após o processo de fabricação do Clínquer, ele é armazenado e pode ser combinado com outros compostos minerais em temperatura ambiente. Em seguida, ele passa pelo processo de moagem e se transforma em cimento.

Após o processo de fabricação do Clínquer, ele é armazenado e, em seguida, ensacado para a comercialização. Esse é um processo simples e linear, onde não há outras etapas adicionais envolvidas.

É importante garantir a qualidade e a segurança do produto durante o armazenamento e o ensacamento, para que ele chegue ao consumidor final em perfeitas condições. O cimento ensacado é amplamente utilizado em construções, desde pequenas reformas até grandes obras, tornando-se um produto essencial para a construção civil.



Figura 188: Forno rotativo. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Nesta imagem, podemos ver a estrutura de um forno rotativo utilizado na produção de cimento. Esse equipamento tem apoios rotativos e pode chegar a ter 2 ou 3 metros de diâmetro. Além disso, ele é equipado com motores elétricos muito fortes para fazer a rotação. A parte de entrada do forno é representada pelo queimador principal, que recebe a mistura homogeneizada da matéria-prima em contracorrente para realizar o processo de fabricação do clínquer.

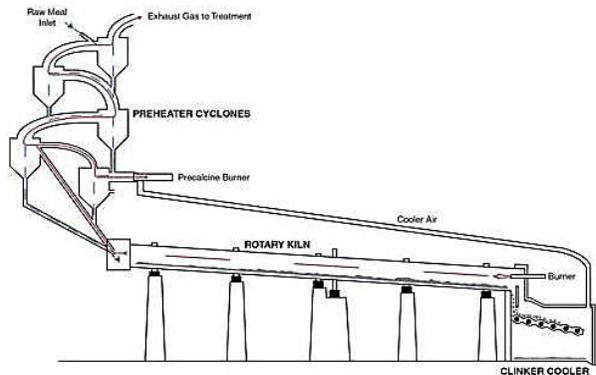
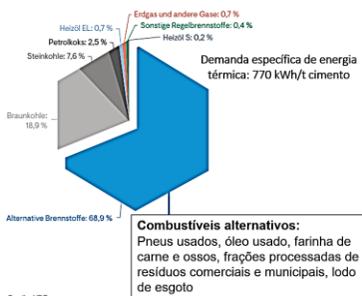


Figura 189: Processo principal: calcinação no forno rotativo. Fonte: <https://cementplantsupplier.com/cement-manufacturing/cement-making-process/>

A produção de cimento exige temperaturas muito elevadas, em torno de 1.450°C , o que requer condições especiais para ser atingido. Para alcançar essas temperaturas, é necessário usar combustíveis como o gás natural, que tem temperatura de chama adiabática de 1.950°C , ou o hidrogênio, que tem 2.250°C com a mistura com ar. No entanto, o hidrogênio tem um problema sério de transferência de calor, já que não tem propriedade radiante.

A demanda de energia térmica na produção de cimento é de cerca de 90%, sendo que 50% do custo de energia na Alemanha é destinado a essa indústria. A tendência é utilizar combustíveis alternativos, como a biomassa, e fazer recuperação de calor. A demanda elétrica é de aproximadamente 10%, e é usada principalmente para movimentar a matéria-prima e acionar o moinho.

Embora a produção de cimento não seja a melhor para a conversão com hidrogênio, a biomassa pode ser uma opção interessante para essa finalidade. Além disso, a produção de eletricidade a partir do processo de combustão pode ser uma possibilidade para o uso de hidrogênio.



Opções de fornecimento de hidrogênio:

- Basicamente concebível como **combustível**
- **Pouca** experiência até o momento com o uso em fornos rotativos na indústria do cimento
- Mistura de hidrogênio até **10 %** não-crítica
- Para maiores proporções, os efeitos na qualidade do produto devem ser investigados

Atual:

- As altas temperaturas são problemáticas para o aquecimento somente com eletricidade
- Uso de tochas de plasma para altas temperaturas
- Os primeiros testes estão planejados
- TRL baixo; opção de longo prazo

Figura 190: Uso de combustível na indústria de cimento (em fornos rotativos). Fonte: vdz, Decarbonization of Cement and Concrete - Mitigation Paths and Action Strategies, 2020.

No que diz respeito ao uso do hidrogênio como combustível na produção de cimento, há pouca experiência nesse tipo de conversão até o momento. É possível fazer uma mistura de até 10%, mas a manutenção de temperaturas tão altas, pode ser problemática.

Além disso, a tecnologia do plasma é considerada promissora, mas ainda é cara para ser operada e o nível de prontidão da tecnologia é baixo. Portanto, ainda são necessários mais estudos e desenvolvimento de tecnologias para viabilizar a utilização do hidrogênio na produção de cimento de forma mais eficiente e econômica.

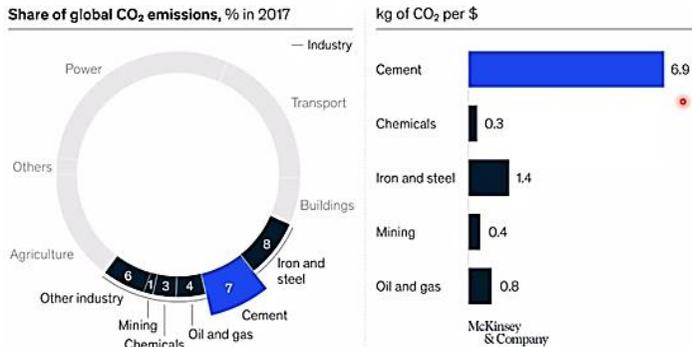


Figura 191: Participação nas emissões globais de Co₂. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Atualmente, para a indústria do cimento, a opção mais viável para o uso do hidrogênio é a conversão elétrica. Isso poderia reduzir significativamente a emissão de CO₂.

No entanto, a produção de cimento requer uma grande quantidade de energia térmica e o hidrogênio não é adequado para essa função devido à sua falta de propriedade radiante. Ou seja, atualmente, a conversão elétrica é a melhor alternativa para o uso do hidrogênio na produção de cimento.

A indústria do cimento continua sendo uma das maiores fontes de emissão de CO₂ no mundo. A maior parte dessa emissão ocorre durante a reação química de calcinação, que é necessária para a produção do cimento. O problema é que essa emissão está intrinsecamente ligada à matéria-prima utilizada, que não é proveniente de fontes de combustíveis fósseis, mas sim do próprio processo de fabricação do cimento.

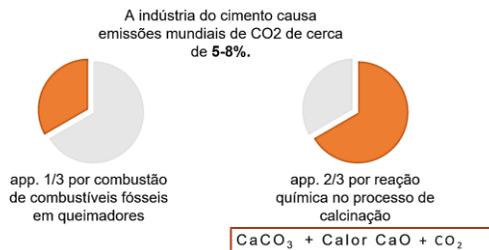


Figura 192: Fontes de emissões de CO₂ da indústria do cimento. Fontes: Worrell, E. et al. (2001): Emissões de Dióxido de Carbono da Indústria Global de Cimento; Lehne, J.; Preston, F. (2018): Fazendo mudanças concretas; Gibbs, M. et. al. (2000): Emissões de CO₂ da Produção de Cimento

Cerca de 2/3 da matéria-prima utilizada nesse processo emite cerca de 7% de CO₂ fóssil no mundo. Isso nos leva a questionar se a argila utilizada na produção do cimento pode ser considerada uma matéria-prima fóssil, visto que não é renovável.

Embora seja possível atenuar a emissão de CO₂ na indústria do cimento, não é realista esperar uma transição para o zero. É importante termos essa consciência e buscar soluções que possam contribuir para a redução das emissões de CO₂, como a utilização de fontes de energia renovável e a recuperação de calor.

- Alto consumo de combustível e alta temperatura (1.450°C);
- CO₂ devido à calcinação de calcário;
- As emissões também são causadas pela eletricidade;

Quase 50% das emissões são liberadas quando o clínquer é calcinado durante o processo de queima no forno, ou seja, as emissões relacionadas ao processo. As emissões restantes são relacionadas à energia e resultam do fornecimento de calor para o processo de queima no forno (combustíveis), consumo de eletricidade para processos de moagem, moagem e transporte, além do transporte de matérias-primas.

A indústria do cimento é uma grande fonte de emissão de CO₂ devido ao seu alto consumo de combustíveis fósseis e ao processo de calcinação do calcário que emite CO₂. Apesar disso, é possível reduzir a pegada de carbono da indústria por meio da eletricidade proveniente de fontes renováveis. No entanto, essa solução não é suficiente para descarbonizar completamente a indústria do cimento. É um desafio que precisa ser enfrentado para mitigar as emissões de gases de efeito estufa.

A indústria de cimento nacional, em colaboração com a Agência Internacional de Energia (IEA), a Corporação Financeira Internacional (IFC) do Banco Mundial e o Conselho Empresarial Mundial Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) desenvolveu um Roteiro Tecnológico do Cimento;

Apresenta diferentes alternativas para mitigar as emissões da indústria nacional, capazes de reduzir as emissões da indústria em

cerca de 35% até 2050. Com isso, a adaptação a cenários consistentes com o de menor impacto climático, limitará o aumento da temperatura global a até 2°C.

O estudo também identifica barreiras ou gargalos e propõe uma série de recomendações para políticas públicas, instrumentos de promoção, regulamentos, aspectos normativos da economia.

A indústria do cimento no Brasil tem um destaque especial por utilizar combustíveis renováveis em seu processo de produção de clínquer, o que a torna a mais limpa do mundo. Essa prática é um diferencial em relação à indústria internacional que, em sua maioria, ainda utiliza combustíveis fósseis. E

A escolha pelo uso de combustíveis renováveis mostra a preocupação do setor em reduzir sua pegada de carbono e contribuir para a sustentabilidade do planeta. É uma iniciativa que deve ser incentivada e disseminada para que outras indústrias possam seguir o exemplo e adotar práticas mais sustentáveis.

Uso do hidrogênio na indústria de cimento – oportunidades e desafios:

Abordagem atual

- Queima parcial com gases de baixa emissão em forno rotativo;
- Separação de CO₂ de processo para produção de produtos químicos básicos (por exemplo, metanol, amoníaco).

Desafios

- Temperaturas de processo acima de 1.450 °C não permitem modificações completas nas novas tecnologias de queimadores (participação máxima de 10% de hidrogênio);
- Chamas de hidrogênio com diferentes radiações de calor e má transferência de calor;
- Construção da infraestrutura de CO₂ e H₂ e estabelecimento de uma cadeia de valor CCUS.

Projetos-piloto

- Estudo de viabilidade: Operações do queimador principal com mistura de 10% de hidrogênio ao gás natural.
- Perguntas abertas
- Qual o valor máximo de hidrogênio para a queima do forno rotativo?

Ao considerarmos a descarbonização da indústria do cimento, é necessário seguir etapas que envolvem a substituição do combustível fóssil, a captura ou separação do CO₂ e o seu uso em outros processos.

O hidrogênio pode ser uma opção interessante de combustível, mas seu volume não pode ser muito grande devido à sua baixa densidade.

Além disso, a transferência de calor é um desafio, pois o hidrogênio emite pouca radiação após a combustão. É importante fazer uma cadeia de valor para captura e sequestro do CO₂ com utilização. Existem projetos piloto em andamento, mas ainda não se sabe qual é o limite de hidrogênio que um processo pode suportar.

Projeto: Catarata e Cementa/Suécia

Vattenfall e Cementa realizarão um estudo aprofundado sobre como uma planta piloto pode ser construída.

Simulações indicaram que qualquer futura eletrificação da fábrica da Cementa em Gotland funcionaria bem em conjunto com a expansão planejada da energia eólica na ilha no Mar Báltico.

O estudo concluiu que a eletrificação do aquecimento no processo de cimento parece ser tecnicamente possível. Entre outras coisas, foi demonstrado que produz certa quantidade de clínquer de cimento baseado inteiramente na tecnologia de plasma. Esta possibilidade precisa ser verificada através de testes em larga escala, disse Vattenfall.

Uma solução eletrificada para o cimento é competitiva em comparação com outras alternativas para alcançar reduções radicais nas emissões.

A eletrificação é uma possibilidade para a indústria do cimento. Na Alemanha e na Suécia, já existem estudos práticos sobre a utilização do hidrogênio em suas instalações.

7.3. Mercado global de vidro:

A indústria do vidro é uma das mais importantes do mundo por causa da sua alta capacidade de faturamento. No entanto, ela é também uma das indústrias que mais emitem gases de efeito estufa, devido às altas temperaturas e ao elevado consumo de energia envolvido em seus processos produtivos.

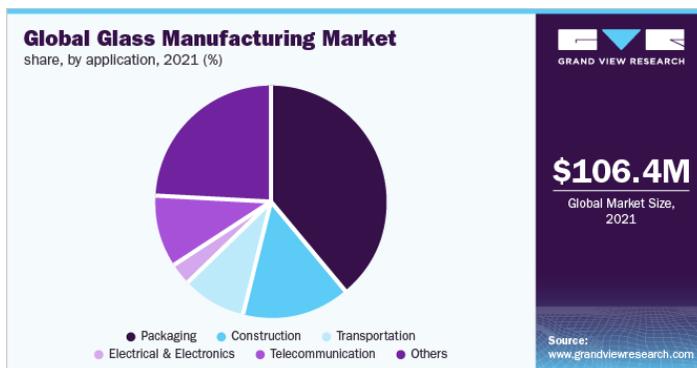


Figura 193: Mercado global de vidro. Fonte: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/glass-manufacturing-market>

A produção de vidro é um processo termoquímico que requer altas temperaturas para fundir e moldar a matéria-prima, o que resulta em altas emissões de CO₂. Portanto, essa indústria é um desafio para a descarbonização e a busca por soluções sustentáveis, incluindo o uso de fontes de energia renovável e tecnologias de captura de carbono.

Existem centenas de processadores de vidro no Brasil, mas existem apenas quatro empresas que fabricam a matéria-prima, o vidro plano:

- Cebrace (Barra Velha, em Santa Catarina, Caçapava e Jacareí, ambas em São Paulo)
- Joint-venture entre Saint-Gobain e NSG/Pilkington, é o maior produtor de vidros e espelhos da América do Sul.
- Guardian Glass (com fábricas em Tatuí, São Paulo, Porto Real, Rio de Janeiro)
- No Brasil desde 1994, a Guardian Glass é um dos maiores fabricantes mundiais, presente em mais de 25 países.
- Guardian Glass (Localizado em Guaratinguetá, interior de São Paulo, desde 2013). Resultado do investimento de R\$ 2 bilhões na primeira filial do Grupo AGC no país, a AGC Brasil produz quase 1.500 toneladas de vidro plano por dia.
- Vivix Vidros Planos (Goiana, Pernambuco), uma empresa do Grupo Cornélio Brennand.
- AGC Brasil, Vivix e Guardian Glass.

A indústria do vidro é uma importante geradora de receita no Brasil. Entretanto, a matéria-prima utilizada por essa indústria, no início da cadeia produtiva, é conhecida como vidro plano. Poucas indústrias no mundo produzem vidro plano devido à sua alta complexidade e ao alto consumo de energia. Isso significa que a produção desse tipo de vidro demanda altos investimentos e grandes quantidades de capital, sendo dominada por algumas multinacionais que atuam nesse mercado.



- O vidro fundido passa por um banho de estanho fundido de 4-8 metros de largura e até 60 metros de comprimento.
- Para evitar que a superfície de estanho se oxide com o oxigênio atmosférico, ele é colocado sob uma atmosfera de gás protetor que deve ser cuidadosamente controlada, uma vez que sua composição é fundamental para as propriedades da superfície de contato entre o vidro e o estanho que, por sua vez, influenciam a espessura da chapa de vidro.

Figura 194: Vidro float (produção de vidro plano) – um processo contínuo. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

A indústria do vidro é uma indústria intensiva em energia e alta temperatura, assim como a indústria do cimento. Ela é linear, com uma sequência de produção sem simultaneidade e envolve temperaturas ainda mais altas, chegando a 1.600 °C. Para alcançar essas temperaturas, é necessário reduzir a mistura de ar ambiente, o que aquece o nitrogênio. No entanto, se não houver nitrogênio, existe a possibilidade de usar oxi-combustão, que requer oxigênio puro e é um processo mais caro.

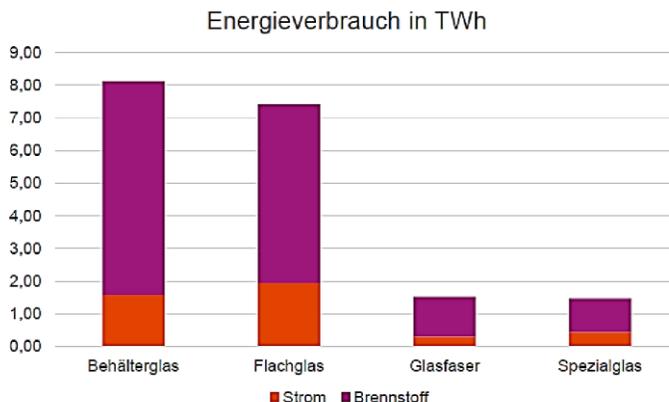
A produção de vidro consome muita energia, especialmente no processo de fusão do vidro, e também envolve a flutuação em banho de estanho, que serve para acomodar o vidro. A produção de vidro lembra um pouco a indústria metalúrgica ou siderúrgica, pois é um processo bastante linear. Além disso, assim como na indústria do cimento, a matéria-prima inicial é um fator crítico nessa indústria.



Figura 195: Processo de fabricação de vidro. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

No processo de produção do vidro, a transferência de calor é realizada principalmente por radiação. Isso significa que a chama utilizada para aquecer o material produz uma grande quantidade de calor radiante, que é absorvido pelo vidro para derretê-lo e moldá-lo.

A indústria do vidro é intensiva em energia, especialmente em calor de processo, que representa a maior parte da demanda de energia. Na produção de garrafas ou vidro plano, por exemplo, substituir parte da energia elétrica por fontes renováveis já é uma medida importante. No entanto, essa substituição representa apenas cerca de 20% da demanda total de energia.



eigene Darstellung nach (Feiler et al., 2013)

Figura 196: Demanda de energia da indústria alemã do vidro
Fonte: Feiler et al, 2013.

A produção de fibra de vidro e vidros especiais também é intensiva em calor direto. A maior parte da demanda de energia vem do uso de gás natural, que representa 75% do total. Portanto, há um grande desafio em encontrar alternativas de fontes de energia mais sustentáveis para a indústria do vidro.

Podemos ver novamente os processos da indústria do vidro, mas de uma forma diferente. A etapa que mais consome energia é o processo de fusão, seguido por outros processos de modelagem e estresse que ocorrem no banho de estanho.

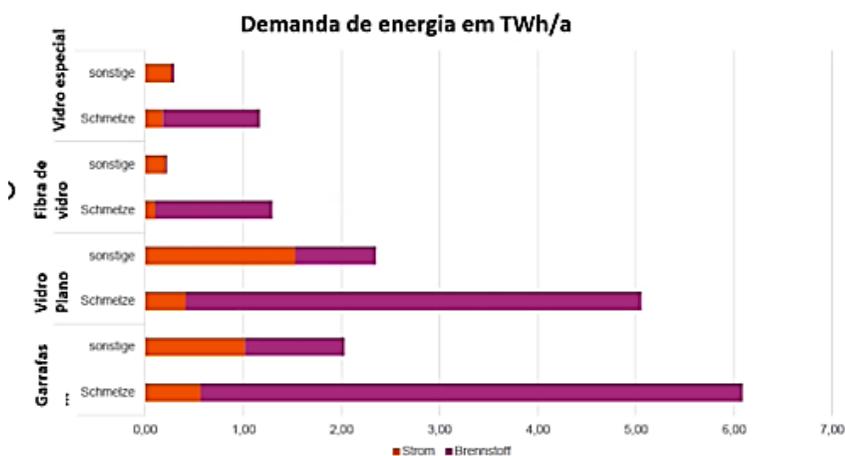


Figura 197: Demanda de energia em TWh/a. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

Na produção de vidro, o processo de fusão é a etapa em que ocorre a transformação dos materiais em vidro líquido. Esse processo é feito em fornos que atingem altas temperaturas, chegando a 1600°C. Já os processos de modelagem e estresse acontecem após a fusão, quando o vidro líquido é moldado e resfriado no banho de estanho.

Esses processos demandam uma quantidade significativa de energia, tornando a indústria do vidro intensiva em energia na forma de calor. Por isso, é um grande desafio encontrar fontes renováveis para substituir os combustíveis fósseis utilizados atualmente na produção de vidro.

Nos últimos vinte anos, a demanda de vidro cresceu mais rapidamente do que o PIB e continua crescendo a quase 4% ao ano.

Os fornos de fusão são os principais usuários de energia, respondendo por mais de 75% de toda a energia necessária. A fusão é com gás natural, aquecimento elétrico, ou uma combinação dos dois.

A eficiência energética do setor pode ser melhorada em até 40%.

O vidro é um material muito utilizado na construção civil e na indústria em geral, mas também é uma fonte significativa de emissões de CO₂. Isso ocorre não apenas durante a sua operação, mas também durante a sua produção. Os processos de fusão e modelagem do vidro são muito intensivos em energia e emitem grandes quantidades de CO₂. O vidro é consumido em grandes quantidades, e há uma crescente demanda por vidros especiais, especialmente na construção de prédios.

Durante a Segunda Guerra Mundial, houve um aumento significativo na produção de vidro devido aos bombardeios que destruíam as janelas das casas. Na saída da guerra, a indústria de vidro ficou ociosa e se criou a moda dos prédios de vidro. Essa indústria é independente da indústria do cimento, mas ambas são intensivas em energia e apresentam grandes desafios para a redução de emissões de CO₂.

O processo de fusão é o que mais consome energia na produção de vidro, e há espaço para melhorias de eficiência energética em todo o mundo. A integração de processos pode ser uma forma de tornar a produção de vidro mais eficiente e sustentável.

Uso do hidrogênio na indústria do vidro – oportunidades e desafios:

Abordagem

- Substituição gradual do gás natural por hidrogênio ou gás natural sintético;
- Desenvolvimento de banho de metal híbrido-elétrico.

Desafios

- Poder calorífico do hidrogênio por m³ um terço do gás natural;
- Infraestrutura de transporte de hidrogênio para o local de fabricação do vidro.

Projetos-piloto

- HyGlass: teste de diferentes misturas gasosas de gás natural e hidrogênio;
- Kopernikus PtX: 8 semanas de operações de teste com hidrogênio como combustível.

Perguntas abertas

- Qual é o impacto do vapor de água na qualidade do vidro?
- A ampliação de novos métodos é viável também para o processamento de vidro reciclado?

A substituição do gás natural por hidrogênio ou por algo sintético é uma das possibilidades que estão sendo estudadas para a indústria.

Além disso, há a opção de substituir os processos que utilizam gás por eletricidade. Essa mudança é um grande desafio, pois é preciso considerar a compatibilidade do hidrogênio em relação ao gás natural em termos de volume. Embora o poder calorífico do hidrogênio seja de 140 MJ/kg, em relação aos 50 MJ/kg do gás natural, quando se considera o volume em m³, o hidrogênio é pior do que o gás natural.

Existem projetos pilotos que misturam gases com hidrogênio em alguns países da Europa, mas há problemas relacionados à queima do hidrogênio, que libera muito vapor d'água. É preciso verificar se isso não irá interferir no processo produtivo. Há um grande interesse em fazer a reciclagem para reduzir o consumo de energia.

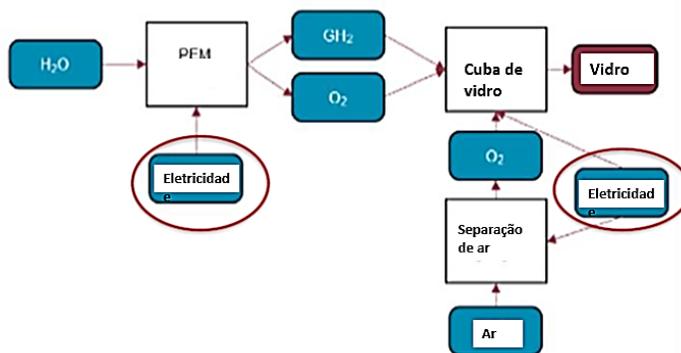


Figura 198: Célula combustível alimentada a hidrogênio, que produz eletricidade e água. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

No contexto das oportunidades, há diversas maneiras de utilizar o hidrogênio, como já discutido anteriormente. Uma delas é através da célula combustível alimentada a hidrogênio, que produz eletricidade e água. Outra maneira é através do uso de motores elétricos alimentados por eletricidade. Porém, na parte de combustão, a

substituição do gás natural pelo hidrogênio não é tão simples de ser feita.

Existem esforços para encontrar soluções, como é o caso da pesquisa conjunta da HYGLASS na Alemanha, que busca aumentar a mistura de hidrogênio nos fornos regenerativos. É importante lembrar que quando se trabalha com altas temperaturas, há uma maior produção de NO_x, o que pode ser prejudicial. Uma solução seria utilizar a rota do oxigênio puro, mas isso é caro e demanda muita eletricidade.

Apesar das dificuldades, existem opções para a utilização do hidrogênio na indústria do vidro e é importante buscar soluções para a redução das emissões de CO₂ e outros poluentes.

Projeto: HyGlass/Alemanha: Pesquisa conjunta com financiamento público da Associação Alemã do Vidro e instituto de pesquisa.

- Possibilidade de utilizar hidrogênio em fornos de vidro regenerativo como substituto a longo prazo para o gás.
- Tanto misturas de hidrogênio-gás, quanto hidrogênio puro foram examinadas.
- Experiências e simulações mostraram que o uso de hidrogênio tem apenas impactos moderados na combustão, desde que a relação combustível-ar e a potência do queimador sejam mantidas a um nível constante.
- Tanto a temperatura do forno quanto a transferência de calor permanecem mais ou menos constantes.
- Uso de hidrogênio pode levar a maiores emissões de NO_x (compensado por medidas técnicas).

A oxi-combustão é uma técnica utilizada na indústria para queimar combustíveis em uma atmosfera de oxigênio puro, sem a presença de ar. Isso pode reduzir as emissões de gases poluentes, como o dióxido de carbono.

No entanto, o grande desafio da oxi-combustão é a produção de oxigênio puro, que requer grandes demandas de energia elétrica e pode tornar o processo financeiramente inviável. Além disso, é necessário fazer ajustes na composição do gás para garantir a eficiência da queima e reduzir as emissões de poluentes.

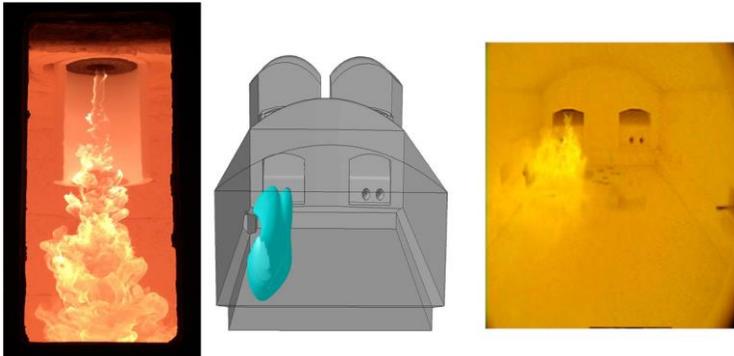


Figura 199: fornos utilizados na produção de vidro. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

Os fornos utilizados na produção de vidro dependem da qualidade da chama que é emitida para aquecer e fundir a matéria-prima. A chama emite radiação no comprimento de onda, importante para o processo. No entanto, ao utilizar hidrogênio como combustível, pode ocorrer um comportamento diferente, em que a chama é produzida, mas não é visível a olho nu. Isso significa que a radiação não foi emitida para o meio, mas o fogo foi projetado para ser radiante da mesma forma.

Projeto: Projeto Kopernikus PtX/Alemanha:

Planta piloto de P2X com hidrogênio da SCHOTT AG testou a fusão de três tipos diferentes de vidro.

O resultado: ao queimar com hidrogênio e oxigênio, foi possível obter um desempenho semelhante do queimador com temperaturas semelhantes às do funcionamento convencional com gás natural e oxigênio.

A qualidade do vidro produzido também era semelhante à do vidro convencional.

Até agora, não era claro até que ponto o vapor de água produzido durante a combustão de hidrogênio poderia afetar negativamente a composição química do vidro.

Os resultados iniciais são promissores, mas certamente mostraram as mudanças induzidas pelo vapor de água nas propriedades do vidro quando queimado com hidrogênio, em comparação com o processo de fabricação convencional.

Do ponto de vista climático, a produção de hidrogênio diretamente na fábrica de vidro seria a melhor opção: as emissões para o transporte do hidrogênio nem sequer ocorreriam, e o oxigênio produzido durante a eletrólise poderia ser reutilizado imediatamente para combustão.

A indústria do vidro é uma grande consumidora de energia e emite CO₂. É importante encontrar maneiras de descarbonizá-la. Um dos principais desafios é substituir o gás natural, muito utilizado nos processos de alta temperatura, por uma fonte de energia mais limpa. O hidrogênio pode ser uma opção, mas é necessário aumentar seu TRL (Technology Readiness Level) para que ele seja viável.

Alguns experimentos mostraram que a queima de hidrogênio e oxigênio pode ter um desempenho semelhante à queima de gás natural e oxigênio, porém, o vapor d'água produzido pode afetar a qualidade do vidro. É preciso avaliar a possibilidade de produzir hidrogênio na fábrica ou importá-lo por meio de uma rede logística.

Na indústria do cimento, cerca de 50% das emissões de CO₂ estão relacionadas ao processo produtivo, não ao combustível. O hidrogênio pode ser utilizado para substituir a eletricidade, mas também é necessário encontrar maneiras de capturar e armazenar o CO₂ emitido durante o processo.

Em resumo, a indústria do vidro e do cimento precisam ser descarbonizadas e o Hidrogênio Verde pode ser uma opção interessante para substituir o gás natural e a eletricidade. Porém, ainda há desafios técnicos a serem superados para tornar sua utilização viável.

7.4. Fornecimento de energia fora da rede e energia de emergência.

A mineração é uma atividade que muitas vezes ocorre em locais distantes da rede elétrica convencional, o que faz ser necessário buscar outras fontes de energia para suprir essa demanda. Além disso, a mineração é uma atividade que exige um grande consumo de energia, o que a torna muito dependente de fontes de energia confiáveis, incluindo a energia de emergência, que deve estar disponível para

garantir a continuidade da produção em casos de interrupções no fornecimento de energia.

Exemplos de aplicação para hidrogênio em abastecimento de energia de emergência:

- Infraestrutura de telecomunicação
- Energia de emergência, energia de reserva;
- Fornecimento de energia descentralizada fora de estrada.
- Infraestruturas críticas e fora da rede
- Telemática, sistemas de orientação de tráfego;
- Túneis, estações de trem, aeroportos;
- Minas, pipeliens;
- Hospitais, polícia, serviços de emergência;
- Estações de medição (por exemplo, poluidores).
- Infraestrutura de TI
- Potência de Byck-up para sistemas críticos.
- Fornecimento de energia fora da rede
- Soluções fora da rede da ilha;
- Energia de emergência;
- Sistemas híbridos com fotovoltaicos e banheiras;
- Armazenamento a longo prazo de energia renovável.

Energia de emergência é aquela utilizada em lugares remotos, como estruturas isoladas ou em regiões onde não há conexão com a rede elétrica principal. Nesses casos, é necessário ter sistemas de geração e armazenamento de energia para garantir o fornecimento contínuo.

Para o armazenamento de energia elétrica de curto prazo, como em situações de uso imediato, é possível utilizar baterias. No entanto, se a necessidade de armazenamento for por um período mais longo, o hidrogênio se mostra uma opção interessante, devido à sua capacidade de armazenamento de longa duração.

O hidrogênio é uma solução adequada para o armazenamento sazonal de energia, pois permite a estocagem por períodos prolongados, sendo considerado um dos principais candidatos para suprir a demanda de energia em regiões isoladas ou em ilhas energéticas.

7.4.1. Sistemas fotovoltaicos-diesel/baterias de células de combustível

Os sistemas híbridos podem ser compostos por diferentes fontes de energia, como diesel e sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.



O objetivo: usar o máximo possível de energia solar em vez de diesel. O conceito de usar o PV como parte do sistema híbrido acaba de ser iniciado.

- **Sistemas híbridos fora da rede (diesel+PV)**
- **Sistemas híbridos conectados à rede**
- **As baterias** como armazenamento a curto prazo aumentam o nível de energia solar utilizável e a economia de diesel
- **A eletrólise** da água permite o armazenamento a longo prazo
- **Os sistemas de células a combustível** podem substituir o gerador a diesel

Figura 200: Sistemas fotovoltaicos-diesel/baterias de células de combustível.

Fontes: Notas de Aulas, 2023.

Como foi dito anteriormente, a bateria é uma opção para armazenamento de energia de curto prazo, enquanto o hidrogênio é uma escolha mais adequada para períodos mais longos, utilizando a técnica de eletrólise e posterior uso em células de combustível. A combinação de diferentes fontes de energia e tecnologias de armazenamento é importante para garantir um fornecimento de energia mais confiável e sustentável em diferentes situações.

Vantagens dos sistemas de células a combustível:

- Sem emissões de CO₂, HC, NOx, ou partículas finas, apenas H₂O vapor;
- Operação silenciosa e sem poluição sonora;
- Opera em todas as condições climáticas entre -30°C e 60°C;
- Fornecimento de calor em forma de célula de combustível;
- Produção local de hidrogênio com energia renovável local.

Os sistemas de célula de combustível são uma opção interessante para substituir os sistemas movidos a diesel, pois não geram as emissões típicas de combustíveis fósseis. Além disso, esses sistemas

são silenciosos e podem operar em uma ampla faixa de condições climáticas, podendo suportar uma diferença de até 90°C entre a temperatura mínima e máxima. Outra vantagem é que é possível utilizar o calor residual da célula a combustível, o que aumenta a eficiência do sistema.

Desvantagens dos sistemas de células a combustível:

- Abastecimento de combustível;
- O armazenamento local de hidrogênio causa custos extras;
- Conversão local de energia em hidrogênio com perdas;
- Restrições técnicas e falta de adequação às exigências rigorosas (por exemplo, ângulo de inclinação para energia de emergência).

Uma desvantagem da célula a combustível é a necessidade de abastecimento. Quando se está conectado à rede elétrica, isso é fácil de ser resolvido.

No entanto, em locais remotos e desconectados da rede, o abastecimento pode ser um problema. Nesses casos, o hidrogênio pode ser utilizado como armazenador de longo prazo para garantir o fornecimento de energia contínuo. Essa é uma solução bastante comum e promissora no uso de células de combustível em áreas isoladas.

7.4.2. Sistemas de células combustíveis escalonáveis para alimentação fora da rede:

No contexto da geração de energia em locais remotos ou ilhados, a produção e armazenamento de hidrogênio são opções promissoras.



Figura 201: Sistemas de células combustíveis escalonáveis para alimentação fora da rede.
Fontes: Notas de Aulas, 2023.

Nesse sentido, já existem soluções móveis, como carretas que realizam a produção e o armazenamento de hidrogênio, além de soluções estacionárias, como carretas equipadas com células de combustível. Essas soluções permitem que o hidrogênio seja produzido e armazenado localmente, garantindo um suprimento confiável de energia em áreas que não estão conectadas à rede elétrica principal.

Casos de Uso:



Figura 202: Casos de Uso. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

Projeto: Guiana Francesa – Usina de Energia Renovável CEOG:

Centrale Electrique de l'Ouest Guyanais (CEOG) é uma combinação de parque solar, armazenamento de hidrogênio a longo prazo e uma bateria (armazenamento de energia a curto prazo) para produzir energia de carga de base;

- Fazenda solar fotovoltaica 55 MW;
- Eletrolizador alcalino de 16 MW, 16 bar;
- Unidade de armazenamento de hidrogênio de 128MWh;
- Produzem aproximadamente 860t/a;
- Células combustíveis geram 3 MW de eletricidade durante a noite.
- O projeto também incluirá um sistema de armazenamento de baterias.
- Uma potência elétrica fixa de 10MW, das 8h às 20h;
- E 3MW das 8pm às 8am;

- Supõe-se que tenha custos mais baixos do que uma usina de energia a diesel.

7.4.3. Aplicação do hidrogênio na indústria de mineração:

Situação

- O diesel é com frequência a única fonte de energia fora da rede e para abastecer seus veículos;
- As operações de mineração utilizam enormes quantidades de diesel, o que representa uma enorme despesa operacional (incluindo altos custos de transporte).

Casos de uso de hidrogênio na indústria de mineração

- Produção local de hidrogênio por energia solar ou eólica como combustível e armazenamento de energia;
- Acionamento de enormes caminhões de transporte com células de combustível de hidrogênio, que transportam o minério e os resíduos no local da mina (até 80% do consumo de diesel no local);
- Acionamento de veículos de pequeno e médio porte normalmente usados para transportar pessoal e máquinas;

Como um redutor na fabricação de "aço verde" e outros metais. Como alternativa ao coque ou ao carvão, o Hidrogênio Verde poderia reduzir drasticamente as emissões de carbono.

A indústria da mineração é frequentemente realizada em locais isolados e remotos, o que a torna muito dependente do diesel como fonte de energia. No entanto, o uso de hidrogênio pode ser uma alternativa interessante para essa indústria. O hidrogênio pode ser produzido localmente por meio da eletrólise e armazenado para uso futuro, o que torna essa fonte de energia mais acessível em áreas remotas. Além disso, o uso de células de combustível movidas a hidrogênio pode substituir o uso de diesel, o que reduziria significativamente as emissões de gases de efeito estufa.

Projeto: AngloAmerica's NuGen, África do Sul:

- O projeto NuGen na mina Mogalakwena, de propriedade da Anglo American subsidiária Anglo American Platinum Ltd. usará energia de uma usina solar de 140 megawatts para fornecer eletrólise de hidrogênio para dividir a água e fornecer os caminhões;
- O hidrogênio pode ser utilizado em caminhões de célula de combustível recém-desenvolvidos que podem transportar até 315 toneladas de minério cada um, com combustível hidrogênio;

A empresa de energia Engie SA ajudou a Anglo a estabelecer o sistema;

O maior caminhão verde-hidrogênio do mundo deve substituir uma frota de 40 veículos movidos a diesel que utilizam, cada um, cerca de um milhão de litros de combustível fóssil por ano.



Figura 203: Caminhão da AngloAmerica movido exclusivamente a hidrogênio.

Fontes: Notas de Aulas, 2023.

Esse é um caminhão movido exclusivamente a hidrogênio, que é muito interessante para a indústria da mineração em locais isolados. Aqui no Brasil, também temos caminhões movidos a hidrogênio. Esses caminhões são gigantes, como podemos ver na foto em que a pessoa mal chega à metade da roda.

Na Austrália, um grande minerador já está utilizando caminhões movidos a hidrogênio em regiões remotas e isoladas. Essa é uma solução muito eficiente e sustentável para a indústria da mineração.

Projeto: Mina Glencore RAGLAN, Canadá:

Fonte de energia renovável a partir de turbina eólica ENERCON E-82 E4 de 3 MW de potência nominal em fundações de aço tipo aranha, colocando a turbina eólica 1 metro acima do solo.

Sistema de armazenamento inovador configurado em uma arquitetura de três camadas.

- Volante rápido transitório 200 kW/ 1,5 kWh KTSI GTR-200 para filtrar grandes variações de energia eólica de curta duração;
- 200 kW/ 250 kWh lectrovaya SuperPolymer 2.0™ Bateria de íons de lítio para a partida de geradores a diesel ou células de combustível para backup de transição;
- HIDROGÊNICOS Sistema 200 kW/ 1 MWh (HySTAT™ 60 Eletrolisador 315 kW).

A mineração em regiões de difícil acesso, como nas regiões árticas, apresenta grandes desafios logísticos. É comum que essas regiões sejam isoladas e apresentem condições climáticas adversas, o que torna a logística de abastecimento de combustíveis fósseis ainda mais difícil.

Nesse contexto, o Hidrogênio Verde surge como uma alternativa promissora para fornecer energia para a mineração nessas regiões. A utilização de células de combustível e o armazenamento de hidrogênio podem garantir o fornecimento de energia de forma sustentável e segura, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e minimizando os impactos ambientais.

Projeto: Mina Glencore RAGLAN, Canadá

Sistema de hidrogênio para minimizar a perda de energia eólica em períodos de tempo mais longos:

- HIDROGÊNICOS Sistema 200 kW/ 1 MWh (HySTAT™ 60 Eletrolisador 315 kW);
- HyPMTM XR 198 kW Proton Exchange Membrane (PEM) célula de combustível).

Desde 2015, o sistema demonstrou com sucesso a interação de múltiplas tecnologias de armazenamento na suavização de perdas repentinas de energia eólica, adaptando-se às quedas e descidas da energia eólica.

O sistema de vento e armazenamento será monitorado por um mínimo de 5 anos sob o programa. Extensão planejada para a microrrede Raglan de 28 MW



Figura 204: Mina Glencore RAGLAN, Canadá. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

Mais um exemplo de situações remotas.

Bell Bay Green Ammonia, Austrália:

Planta de amônia verde da Fortescue:

- planta de Hidrogênio Verde de 250MW e amônia verde de 250.000 toneladas por ano para mercado nacional e internacional.

- Uma das maiores usinas de Hidrogênio Verde do mundo ☒ energia renovável da Tasmânia.



Figura 205: Bell Bay, Austrália. Fontes: Notas de Aulas, 2023.

As plantas de amônia verde são uma excelente forma de transportar e armazenar hidrogênio. Na Tasmânia, uma ilha ao sudeste da Austrália, é possível encontrar essas plantas. Isso nos mostra que a energia fora da rede é muito semelhante ao fornecimento de energia de emergência.

O hidrogênio pode oferecer uma confiabilidade interessante e uma solução de energia limpa, sendo capaz de funcionar como um bom armazenador. Na mineração, em locais remotos, essa direção é ainda mais interessante, pois há um grande interesse em produzir hidrogênio para armazená-lo e utilizá-lo quando necessário, diminuindo a dependência do transporte de diesel para regiões distantes. O hidrogênio pode oferecer uma independência de fornecimento de energia e tornar a mineração mais sustentável.

8. Referências

Industry Profile Steel, BMWI:

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbriefstahl.pdf?__blob=publicationFile&v=4,
último acesso 29.11.21

Agência Federal do Meio Ambiente:

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>, último acesso:
29/11/21.

Conselho Mundial de Energia:

https://www.weltenergieerat.de/wp-content/uploads/2019/06/91701_DNK_Energie2019_Kap3.pdf, último acesso
11/29/21.

Wikipedia da indústria siderúrgica:

https://de.wikipedia.org/wiki/Stahlindustrie/Tabellen_und_Grafiken, última vez que foi
acessado 29.11.21

<https://ourworldindata.org/>

CLIMATE WATCH, THE WORLD RESOURCES INSTITUTE. Research and data to make progress against the world´s largest problems, 2020.

Kempken, T., Setor de acoplamento da indústria de energia com a indústria de aço e cimento, 2021

H2 -Masterplan for Eastern Germany, Fraunhofer, 2021

CH JU, Roteiro do Hidrogênio Europa, 2019

<https://www.h2future-project.eu/>

Somers, J., Technologies to decarbonise the EU steel industry, EUR 30982 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, ISBN 978-92-76-47147-9 (online), doi:10.2760/069150 (online), JRC127468.

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC127468>

<https://www.h2future-project.eu/>

Green steel <https://www.youtube.com/watch?v=zK5-8DM00vA>

Hybrit green steel initiative: <https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/hybrit-a-new-revolutionary-steelmaking-technology#video>

Hybrit project: <https://group.vattenfall.com/what-we-do/fossil-free-progress/fossil-free-steel> (several videos)

<http://www.fertilizer.org/>

<http://anda.org.br/>

Elektra tug ship:

<https://www.youtube.com/watch?v=gdBwdcOnRT0&feature=youtu.be>

HEE technologies: <https://www.hee-technologies.com/>

H2 combustion engine: <https://www.deutz.com/>

PART III GREEN HYDROGEN COST AND POTENTIAL

<https://irena.org/publications/2022/May/Global-hydrogen-trade-Cost>

<https://ourworldindata.org>

<https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

Kempken, T., Setor de acoplamento da indústria de energia com a indústria de aço e cimento, 2021

H2 -Masterplan for Eastern Germany, Fraunhofer, 2021

FCH JU, Roteiro do Hidrogênio Europa, 2019

Financial Times, The race to scale up green hydrogen, 2021]

S&P Global

Agora Energiewende, Hidrogênio Sem Regressão, 2021

IRENA, Geopolítica da Transformação de Energia O Fator Hidrogênio, p.20/fig.1.1., 2022

https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022.pdf

IEA, Global Hydrogen Review 2021, 2021, p.171.

BloombergNEF, Hydrogen Economy Outlook, 2020, p.6/fig.7.

Agora Energiewende, Agora Industry, 12 Insights on Hydrogen, 2021, p. 12/fig.4.

Oxera (2021) <

<https://www.oxera.com/insights/agenda/articles/high-time-for-hydrogen-establishing-a-hydrogen-value-chain-in-europe/>>

DLR, Hidrogênio como base para a transição energética, 2020

Harks, E., power to gas to refining to fuel, Green H2 in Industry, 2018.

Yugo, M., Green Hydrogen Opportunities in the EU Refining System, Green H2 in Industry, 2018.

https://www.researchgate.net/publication/327846242_Direct_upstream_integration_of_biogasoline_production_into_current_light_straight_run_naphtha_petrorefinery_processes

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2016/gc/c6gc01644h>

https://www.researchgate.net/publication/228440711_Commercializing_Biorefinery_Technology_A_Case_for_the_Multi-Product_Pathway_to_a_Viable_Biorefinery

https://www.researchgate.net/publication/336761076_Introductory_Chapter_Objectives_and_Scope_of_Bioeconomy

<https://www.shell.de/medien/shell-presseinformationen/2021/shell-will-synthetisches-kerosin-in-rheinland-raffinerie-produzieren.html>

Shell, H2Congress, 2018

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf>

Forschungszentrum Jülich, Estratégias para um fornecimento de energia neutro em termos de gases de efeito estufa até o ano 2045, 2021

Schneider, C. , Potenciais de aplicação a curto prazo e requisitos de longo prazo para hidrogênio verde na indústria, Conferência Anual FVEE 2021

Forschungszentrum Jülich, Estratégias para um fornecimento de energia neutro em termos de gases de efeito estufa até o ano 2045, 2021

Oxera (2021) <

<https://www.oxera.com/insights/agenda/articles/high-time-for-hydrogen-establishing-a-hydrogen-value-chain-in-europe/>>

DLR, Hidrogênio como base para a transição energética, 2020

Harks, E., power to gas to refining to fuel, Green H2 in Industry, 2018.

Yugo, M., Green Hydrogen Opportunities in the EU Refining System, Green H2 in Industry, 2018.

<https://www.shell.de/medien/shell-presseinformationen/2021/shell-will-synthetisches-kerosin-in-rheinland-raffinerie-produzieren.html>

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-667/NT-EPE-DPG-SDB-2022-01%20-%20Hidrog%C3%AAnio%20em%20Refinarias.pdf>

Forschungszentrum Jülich, Estratégias para um fornecimento de energia neutro em termos de gases de efeito estufa até o ano 2045, 2021

Schneider, C. , Potenciais de aplicação a curto prazo e requisitos de longo prazo para hidrogênio verde na indústria, Conferência Anual FVEE 2021

Neumann, B., Properties of hydrogen, 2008 (adaptado).

Forschungszentrum Jülich, Estratégias para um fornecimento de energia neutro em termos de gases de efeito estufa até o ano 2045, 2021

www.capitalreset.com/startup-de-aco-verde-vai-estrear-tecnologia-no-brasil/

<https://www.capitalreset.com/startup-de-aco-verde-vai-estrear-tecnologia-no-brasil/>

<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/aco-verde>

Perfil da Indústria de Aço, BMWI:

https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbriefstahl.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Industry Profile Steel, BMWI:

https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbriefstahl.pdf?__blob=publicationFile&v=4,
último acesso 29.11.21

Agência Federal do Meio Ambiente:

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>,
último acesso: 29/11/21.

Conselho Mundial de Energia: https://www.weltenergieerat.de/wp-content/uploads/2019/06/91701_DNK_Energie2019_Kap3.pdf,
último acesso 11/29/21.

Wikipedia da indústria siderúrgica:

https://de.wikipedia.org/wiki/Stahlindustrie/Tabellen_und_Grafiken,
última vez que foi acessado 29.11.21

Process chain primary/secondary steel route Source: Lohse 2016
Stahlbau 1

<http://www.carmeuse-steel.com/your-applications/sintering-iron-ore>

Cadeia de processo rota do aço primário/secundário Fonte: Lohse
2016 Stahlbau 1

Ahrenhold, F., Pathways to Climate Neutral Steel Production,
Conferência IRES, 2021

Cadeia de processo rota do aço primário/secundário Fonte: Lohse
2016 Stahlbau 1

<https://www.h2greensteel.com/articles/green-steel-production>

Buergler, T., Green H2 Oportunidades na Siderurgia, Green H2 na Indústria, 2018

De Coninck, H2 na siderurgia, Verde H2 na indústria, 2018

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI\(2020\)641552_PT.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/641552/EPRS_BRI(2020)641552_PT.pdf)

Hille, V., SALCOS Salzgitter Low CO2 Siderurgia, Verde H2 na Indústria, 2018

Circored™ redução baseada em hidrogênio - Metso Outotec (mogroup.com)

Ahrenhold, F., Pathways to Climate Neutral Steel Production, Conferência IRES, 2021 (adaptado).

Buergler, T., Green H2 Oportunidades na Siderurgia, Green H2 na Indústria, 2018

<https://www.h2future-project.eu/>

<https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/hybrit-a-new-revolutionary-steelmaking-technology#video>

<https://group.vattenfall.com/what-we-do/fossil-free-progress/fossil-free-steel>

<https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/tackling-the-challenge-of-decarbonizing-steelmaking>

Görner, K., Energiewende Industrie, 2021

SRU, Declaração sobre Hidrogênio na Proteção Climática, 2021

www.abiquim.oig.bi

Einführung in die Technische Chemie 2. Auflage, Arno Behr et al., 2016

Duden Learnattack GmbH: Verwendung von Chlor und Natronlauge, 2022

Kurzweiler: Angewandte Elektrochemie, 2020

https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Chloralkalielektrolyse_-_Lippert_Rathmann_.pdf

<https://www.linde-engineering.com/en/about-linde-engineering/success-stories/flexible-air-separation.html>

Sterner, M. u. Stadler, I.: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, 2014

[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-05-19%20-%20GN_Metanol%20\(002\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/EPE-DEA-IT-05-19%20-%20GN_Metanol%20(002).pdf)

www.abiquim.oig.bi

Leren, E., Green Hydrogen for Green Ammonia, Green H2 in Industry, 2018, Ammonia Market Size, Share, Growth | Industry Report, 2028 (marketresearchfuture.com)

Wisconsin. Haber-Bosch Process.

<https://wisc.pb.unizin.org/chem109fall2021ver02/chapter/haber-bosch-process/>

Smith et al. Energy & Environmental Science 2020;13:331-44.

<https://doi.org/10.1039/C9EE02873K>.

Nölker, K., Ammonia as a hydrogen carrier, German Engineering Day, VDI, 2021.

Han, P., Dynamic Green Ammonia by Haldor Topsoe, 2021.

Swarts, R., Use of Hydrogen for selected Industrial Processes - Ammonia, Green H2 in Industry, 2018.

Leren, E., Green Hydrogen for Green Ammonia, Green H2 in Industry, 2018.

Nölker, K., Ammonia as a hydrogen carrier, German Engineering Day, VDI, 2021.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/cc/c0cc01982h>

Chatterjee, S. Limitations of Ammonia as a Hydrogen Energy Carrier for the Transportation Sector. 2021

Thyssen Krupp AG, 2018,
<https://www.ammoniaenergy.org/articles/green-ammonia-plants-commercially-available-today/>

Philibert, C., Renewable Energy for Industry, Green H2 in Industry, 2018.

<https://agropos.com.br/o-que-sao-fertilizantes/>

<https://www.argusmedia.com/en/blog/2021/may/19/decarbonizing-the-fertilizer-industry-is-green-ammonia-the-answer-or-should-we-focus-elsewhere>

<https://www.digifarmz.com/blog/fixacao-biologica-nitrogenio/>

<https://www.comprerural.com/brasil-tera-a-maior-fabrica-de-world-green-hydrogen/>

FCH JU, Roteiro do Hidrogênio Europa, 2019

H2BRASIL



www.quali-a.com/h2brasil



Por meio da:



Apoio:



Organização:

