

Revista

Cadernos de Finanças Públicas

02 | 2023



TESOURO NACIONAL

PLANO ESTRATÉGICO DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE HIDROGÊNIO VERDE E DERIVADOS JUNTO AO PORTO DE ITAGUAÍ, NO RIO DE JANEIRO

Dr. Maurício Araquam de Sousa

Rede Brasileira de Certificação, Pesquisa e Inovação

Dr. Marcelo Estrela Fiche

Rede Brasileira de Certificação, Pesquisa e Inovação

Gustavo Sepúlveda Rodrigues Sato

Rede Brasileira de Certificação, Pesquisa e Inovação

RESUMO

Esta tese se dedica à exploração do desenvolvimento de clusters industriais de hidrogênio verde, com um foco específico na possível criação de um cluster próximo ao Porto de Itaguaí, no Brasil. Os objetivos centrais deste estudo abrangem diversas facetas críticas deste empreendimento. Inicialmente, almeja-se uma avaliação abrangente do mercado de hidrogênio verde, incluindo um mapeamento detalhado das oportunidades disponíveis e a identificação de potenciais compradores. A localização estratégica de Itaguaí e a dinâmica do mercado são levadas em consideração nessa análise.

Além disso, este estudo delinea um modelo abrangente que abarca todos os estágios do desenvolvimento de um cluster de hidrogênio verde, desde a concepção inicial até a expansão, com um foco especial na necessidade de flexibilidade e escalabilidade em resposta às mudanças nas condições de mercado e aos avanços tecnológicos. Destaca-se também a importância crucial da eficiência de um cluster e da gestão adequada das partes interessadas como pilares para o sucesso e a sustentabilidade desses empreendimentos, incluindo estratégias para promover a colaboração entre entidades governamentais, empresas privadas, instituições de pesquisa e comunidades locais.

A pesquisa investiga igualmente os requisitos essenciais de infraestrutura necessários para viabilizar a produção e a distribuição de hidrogênio verde, cobrindo desde instalações de eletrólise de ponta até redes de transporte e soluções de armazenamento. Por último, analisa-se a possível integração do hidrogênio verde na indústria química e seu alinhamento sinérgico com os planos de desenvolvimento da Petrobras e os projetos de energia renovável em andamento na região.

Ao abordar esses componentes-chave, esta tese busca fornecer um roteiro abrangente para o estabelecimento de clusters de hidrogênio verde, contribuindo, em última análise, para o avanço das práticas de energia sustentável no cenário industrial do Brasil.

Palavras-chave: Complexo Portuário de Itaguaí, Transição Energética, Energia Renovável, Descarbonização e Infraestrutura Portuária.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. O COMPLEXO PORTUÁRIO DE ITAGUAÍ NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENER- GÉTICA.....	7
3. A INDÚSTRIA DO HIDROGÊNIO	12
4. A EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL: PROGRAMA GLOBAL DA UNIDO PARA O HIDROGÊNIO	15
5. CARACTERÍSTICAS DOS CLUSTERS INDUSTRIAIS DE HIDROGÊNIO VERDE ...	17
5.1 Disponibilidade de fontes renováveis de eletricidade.....	17
5.2 Localização e acesso a utilidades e instalações auxiliares	18
5.3 Composição, escala e sinergias	18
5.4 Estudo de caso: GreenLab Skive (Greenfield site).....	19
6. VISÃO GERAL DOS USOS DO HIDROGÊNIO VERDE	21
6.1 Hidrogênio no setor industrial.....	22
6.2 A Estudo de Caso: Desenvolvimento de projetos de aço verde: lições aprendidas com H2 Green Steel (H2GS).....	25
6.3 Hidrogênio na indústria química	27
6.4 Amônia	27
6.4.1 Projetos de produção de hidrogênio verde e amônia: lições aprendidas com a Am- monia Association.....	28
6.4.2 Oportunidade nacional no mercado amônia.....	29
6.5 Metanol	31
6.5.1 Produção de Metanol Renovável	33
6.5.2 Progresso atual na produção de metanol renovável	34
6.5.3 Competitividade de custo do metanol renovável	35
6.5.4 Oportunidade nacional no mercado metanol	38
6.6 Combustíveis sintéticos	39
6.7 Vantagens da estruturação de clusters de hidrogênio verde	41
7. ESTRATÉGIAS PARA A VIABILIZAÇÃO DE PROJETOS EM UM FUTURO CLUS- TER DE HIDROGÊNIO VERDE JUNTO AO PORTO DE ITAGUAÍ.....	41
8. CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

1. INTRODUÇÃO

Este estudo tem como foco uma exploração estratégica do potencial de desenvolvimento do hidrogênio verde e de seus derivados no contexto dinâmico do Porto de Itaguaí, no Rio de Janeiro, Brasil. O Porto de Itaguaí, situado ao longo da costa norte da Baía de Sepetiba, tem aproximadamente 7,2 milhões de metros quadrados e está localizado em um eixo logístico estratégico, a aproximadamente 90 quilômetros a oeste do Rio de Janeiro (ou 60 milhas náuticas a sudoeste do Porto do Rio de Janeiro, no caso do modal aquaviário). Esse movimentado centro marítimo compreende o porto organizado de Itaguaí, supervisionado pela Portos Rio, antiga Companhia Docas do Rio de Janeiro (CDRJ), e também Terminais de Uso Privado (TUPs) autorizados pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), que compartilham o acesso terrestre e aquaviário com o porto organizado.

O Porto de Itaguaí é conhecido por sua movimentação de granéis minerais sólidos, principalmente minério de ferro proveniente da Vale S.A. ou com destino a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), além de contêineres e produtos siderúrgicos. O TUP da Nuclep, por sua vez, foi construído para agilizar o fluxo de produtos da empresa de caldeiras pesadas Nuclep. Atualmente, o Porto Sudeste é especializado exclusivamente no manuseio de minério de ferro, assim como o TIG, um terminal privado operado pela Vale S.A. O Terminal da Ternium Brasil, por outro lado, gerencia principalmente produtos siderúrgicos e fluxos de carvão, atendendo à unidade de produção adjacente.

O transporte eficiente e a acessibilidade constituem a força vital deste Complexo Portuário. Esse ecossistema é interligado por uma extensa rede de rodovias, incluindo as rodovias federais BR-116, BR-465, BR-101 e BR-493, e as rodovias estaduais RJ-105 e RJ-099. O acesso ferroviário é facilitado pela concessão ferroviária da MRS Logística S.A., que atende ao Porto Organizado de Itaguaí, ao Porto Sudeste e aos TUPs do TIG. Já o acesso aquaviário é definido por canais dedicados para cada instalação portuária, compreendendo o canal de acesso ao TIG, o canal de acesso ao Porto de Itaguaí, o canal de acesso ao Porto Sudeste, o canal de acesso ao Terminal da Ternium Brasil e o canal de acesso ao TUP Nuclep.

A importância do Complexo Portuário vai muito além de seu papel como porta de entrada marítima; ele é um ponto de apoio no cenário mais amplo da transição energética. Está estrategicamente posicionado entre as maiores cidades do Brasil: Rio de Janeiro e São Paulo, apresentando grande potencial de setor um player no setor de hidrogênio, principalmente ante a sinergia com as operações de mineração da Vale e com as iniciativas pioneiras de descarboni-

zação da Ternium (já iniciadas em suas plantas industriais no México).

Esse estudo detalha o potencial de adoção do hidrogênio nos setores de refino de petróleo e no setor de fertilizantes, tendo o hidrogênio verde sido adotado com principal estratégia de descarbonização da indústria europeia, com aplicabilidade mais ampla em setores como aço, metalurgia, cerâmica, produção de vidros e cimento. É importante ressaltar que, embora o foco principal deste documento se refira a futuros projetos de hidrogênio verde (produzido com o uso de fontes de energias renováveis), é imperativo reconhecer que, em 2023, uma parte substancial, aproximadamente 74%, do hidrogênio consumido na indústria brasileira é proveniente de refinarias, não tendo origem renovável. De acordo com a Confederação Nacional da Indústria, o crescimento previsto da demanda de hidrogênio no Brasil será predominantemente impulsionado pelo hidrotreamento de derivados de petróleo e pela produção de combustíveis avançados para atender a regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas.

Além disso, o desenvolvimento reacendido pelo Itaboraí GasLub Hub, originalmente concebido como Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ) pela Petrobras, cria sinergias potenciais com um futuro HUB de hidrogênio verde próximo ao Porto de Itaguaí. O GasLub Hub contará com uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN) preparada para receber gás natural da Bacia de Santos, reforçando o suprimento doméstico de gás e reduzindo a dependência das importações de GNL. Ao mesmo tempo, a Petrobras está retomando os investimentos em petroquímica com um foco renovado na transição energética, incluindo a produção de biocombustíveis.

Em conjunto com iniciativas governamentais de incentivos fiscais para projetos com uso intensivo de gás, como é o caso dos projetos de fertilizantes nitrogenados, essas iniciativas poderão vir a se harmonizar com futuros empreendimentos de hidrogênio verde.

Nesse sentido, a produção de amônia representa um mercado robusto para projetos de hidrogênio. A forte dependência do Brasil quanto a amônia importada, um insumo essencial para fertilizantes nitrogenados, posiciona estrategicamente este tipo de empreendimento junto ao porto. A amônia também está ganhando destaque atualmente como um combustível marítimo, oferecendo assim oportunidades adicionais para o Porto de Itaguaí. Essa sinergia se estende à possibilidade de estruturação de instalações de abastecimento (*bunkers*) de metanol, atendendo às necessidades em evolução do setor marítimo.

A produção de metanol verde, em particular, é imensamente promissora, não apenas para o transporte marítimo, mas também para as indústrias domésticas, dada a atual dependência de importação de metanol, para atendimento principalmente aos setores de biodiesel e plásticos.

Para desbloquear essas oportunidades, este estudo apresenta uma estratégia abrangente, impulsionada por meio de uma usina de etanol de grande escala, a ser acoplada a um reformador (para produção do hidrogênio a partir do etanol a ser produzido) e a uma unidade de produção de metanol verde na retroárea do porto, otimizando sua logística ferroviária e hidroviária. A alta viabilidade econômica deste empreendimento poderia vir a sustentar a produção de hidrogênio verde e metanol (por meio da reforma do etanol e captura do carbono gerado pela atividade de fermentação realizada na própria planta), criando um modelo para iniciativas semelhantes não apenas no Brasil, mas em todo o mundo.

Esse estudo também realiza uma exploração aprofundada no setor de energia, destacando o uso do hidrogênio verde, produzido por meio da eletrólise da água alimentada por fontes renováveis de energia. Ao contrário do hidrogênio cinza, originário de combustíveis fósseis e que libera emissões de CO₂, o hidrogênio verde representa uma alternativa energética sustentável e ecologicamente correta. Seu potencial para descarbonizar diversos setores com uso intensivo de energia e, ao mesmo tempo, mitigar as emissões de gases de efeito estufa, posicionam o uso do hidrogênio verde como uma estratégia relevante na transição de sistemas globais de energia e também na produção industrial limpa.

As aplicações do hidrogênio verde são amplas, servindo essa molécula como um componente essencial em processos industriais, como o refino de petróleo, produção de amônia, metanol e toda uma gama de combustíveis sintéticos. O hidrogênio também pode vir a apoiar a geração de energia, em toda uma nova gama de tecnologias aplicadas a turbinas, motores, células de combustível e bombas de calor. No âmbito da mobilidade e logística, o hidrogênio verde surge como um combustível limpo e sustentável no transporte aéreo, marítimo, rodoviário e ferroviário, com o uso cada vez maior de células de combustível em soluções de energia e transportes.

À medida em que o mundo se volta cada vez mais para a descarbonização e para as energias renováveis, a demanda por hidrogênio verde tende a crescer em diversos setores.

Esta introdução estabelece a base para uma exploração abrangente do potencial do hidrogênio verde no Porto de Itaguaí, com impactos para todo o Brasil, ante as ramificações desta proposta para a sustentabilidade e transição energética nacional.

2. O COMPLEXO PORTUÁRIO DE ITAGUAÍ NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O Porto de Itaguaí está localizado na costa norte da baía de Sepetiba, no Município de Itaguaí, Estado do Rio de Janeiro, ao sul e a leste da Ilha da Madeira, ocupando uma área aproximada de 7,2 milhões de m². Dista aproximadamente 90 km, na direção oeste, do município do Rio de Janeiro e cerca de 60 milhas marítimas, na direção sudoeste, do Porto do Rio de Janeiro.

O Complexo Portuário de Itaguaí é composto pelo porto organizado de Itaguaí, administrado pela Portos Rio, antiga Companhia Docas do Rio de Janeiro (CDRJ) e por Terminais de Uso Privado (TUP) que possuem exploração autorizada pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ) e que compartilham acessos terrestres e aquaviários com aquele porto organizado.

Ao todo, quatro Terminais de Uso Privado (TUP) compõem o Complexo Portuário:

1. TUP Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A. (Nuclep);
2. Porto Sudeste;
3. Terminal Ilha Guaíba (TIG); e
4. Terminal Ternium Brasil.

De acordo com o Plano Mestre do Complexo Portuário de Itaguaí (Ministério da Infraestrutura, 2019), cada instalação portuária em operação apresenta a seguinte movimentação de cargas:

- O Porto de Itaguaí destaca-se pela movimentação de granéis sólidos minerais, com destaque para o minério de ferro das empresas Vale S.A. e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), além de contêineres e produtos siderúrgicos;
- O TUP Nuclep foi construído para otimizar o escoamento dos produtos da empresa de caldeiraria pesada Nuclep, planta industrial onde os equipamentos e peças desta empresa são fabricados;
- O Porto Sudeste, que atualmente movimenta exclusivamente o minério de ferro;
- O TIG, terminal privado da Vale S.A., que também é dedicado a operações de minério de ferro;
- O Terminal Ternium Brasil opera principalmente produtos siderúrgicos e carvão originados ou destinados à unidade produtiva da empresa, localizada na retroárea do porto.

Os acessos ao Complexo Portuário de Itaguaí compreendem:

1. **Acesso rodoviário:** o acesso à hinterlândia do Complexo Portuário de Itaguaí é realizado pelas rodovias federais BR-116, BR-465, BR-101 e BR-493, sendo a última conhecida como Arco Metropolitano, e pelas rodovias estaduais RJ-105 e RJ-099,⁸

por onde as cargas com origem ou destino ao Complexo Portuário são transportadas.

2. **Acesso ferroviário:** a malha ferroviária associada ao Complexo Portuário de Itaguaí é composta pela concessão ferroviária sob responsabilidade da MRS Logística S.A. Dentre as instalações portuárias do Complexo, apresentam expedição e recepção ferroviária tanto o Porto Organizado de Itaguaí quanto os TUPs Porto Sudeste e TIG.
3. **Acesso aquaviário:** o acesso aquaviário a cada instalação portuária é analisado a partir da seguinte distinção: Canal de acesso ao TIG, Canal de acesso ao Porto de Itaguaí, Canal de acesso ao Porto Sudeste, Canal de acesso ao Terminal Ternium Brasil e Canal de acesso ao TUP Nuclep.

Quanto ao desempenho de suas funções primárias de armazenagem de cargas e transbordo, a figura abaixo mostra a projeção da expansão da movimentação de cargas do porto até 2060:

Figura 1 - Projeção de demanda de cargas (em mil toneladas) no Complexo Portuário de Ita-

Natureza de carga	Carga	Tipo de navegação	Sentido	2017 (t)	2020 (t)	2025 (t)	2030 (t)	2035 (t)	2040 (t)	2045 (t)	2050 (t)	2055 (t)	2060 (t)
Granel sólido mineral	Minério de ferro	Longo curso	Embarque	98.871	101.843	130.431	117.281	121.854	124.521	126.257	128.580	131.665	134.284
	Carvão mineral	Longo curso	Desembarque	5.288	5.534	5.688	5.796	5.955	6.155	6.378	6.604	6.830	7.053
	Coque de petróleo	Longo curso	Desembarque	1.108	1.139	1.189	1.196	1.222	1.248	1.268	1.293	1.317	1.339
	Outros minérios, metais e pedras	Longo curso	Desembarque	717	745	823	911	982	1.030	1.064	1.098	1.132	1.165
Carga geral	Barrilha	Longo curso	Desembarque	45	46	50	55	62	71	81	94	106	118
	Produtos siderúrgicos	Longo curso	Embarque	3.707	4.056	4.419	4.856	5.381	5.808	6.220	6.628	7.027	7.476
Contêineres	Produtos siderúrgicos	Longo curso	Desembarque	117	128	134	143	154	163	172	181	190	198
	Contêineres	Longo curso	Desembarque	836	925	1.044	1.152	1.270	1.403	1.605	1.942	2.190	2.437
	Contêineres	Longo curso	Embarque	647	695	776	877	977	1.081	1.144	1.228	1.312	1.396
	Contêineres	Obotagem	Embarque	774	881	995	1.150	1.315	1.478	1.639	1.798	1.958	2.117
	Contêineres	Cobotagem	Desembarque	548	579	625	688	758	825	889	952	1.015	1.079
Outros				73	77	82	88	94	100	106	112	118	123
Total				112.752	116.623	126.210	134.284	140.024	143.927	146.914	150.520	154.888	158.797

Fonte: ANTAQ (2017). Elaboração: LabTrans/UFSC (2019)

Localizado em uma posição estratégica entre as maiores cidades do país (Rio de Janeiro e São Paulo), as atividades desenvolvidas no Complexo Portuário de Itaguaí guardam alta conexão com a indústria do hidrogênio, principalmente no que se refere às atividades de mineração da empresa Vale e à produção de aço realizada pela Ternium, que já está implantando um programa de descarbonização em suas plantas industriais no México, como detalharemos mais adiante.

O presente estudo também detalhará que os setores de refino de petróleo e de fertilizantes têm potencial de uso imediato do hidrogênio na implementação de suas estratégias de descarbonização. Já no médio prazo (nos próximos cinco anos) os segmentos de siderurgia, metalurgia, cerâmica, vidro e cimento também se colocam como potenciais consumidores do hidrogênio no país.

Embora o foco do presente trabalho seja detalhar rotas para a viabilização de projetos de hidrogênio junto ao porto, com enfoque no hidrogênio produzido de fontes renováveis de energia, devemos esclarecer que hoje (2023) cerca de 74% do hidrogênio consumido na indústria brasileira é proveniente de refinarias, não sendo, portanto, um hidrogênio produzido de fontes renováveis.

Segundo a Confederação Nacional da Indústria (em “Hidrogênio sustentável: perspectivas e potencial para a indústria brasileira”, 2022) o crescimento da demanda por hidrogênio no Brasil virá, **em primeiro lugar, para o hidrotreamento de derivados de petróleo** e produção de combustíveis avançados para atendimento de regulações ambientais cada vez mais exigentes, destacando-se também o crescimento da aplicação do hidrogênio em óleos vegetais, como matéria-prima no refino.

Ainda sobre o setor petroquímico, o Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), foi um empreendimento projetado pela Petrobras para ser implantado no município de Itaboraí, no estado do Rio de Janeiro, em região integrante da hinterlândia do porto de Itaguaí.

O projeto foi modificado e atualmente se chama Pólo GasLub Itaboraí, onde está sendo construída uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), que receberá o gás natural da Bacia de Santos através do gasoduto Rota 3. Quando concluída, a unidade terá capacidade para escoar e processar diariamente 21 milhões de metros cúbicos de gás do pré-sal.

O Pólo Gaslub, hoje em construção, deverá abrigar a Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), que receberá gás vindo do polígono do pré-sal da Bacia de Santos, por meio de um gasoduto (“Rota 3”) com cerca de 355 quilômetros de extensão. A unidade terá capacidade para escoar e processar mais 21 milhões de metros cúbicos de gás natural por dia, incrementando a oferta de gás para o mercado brasileiro e reduzindo a dependência às importações de GNL.

As obras foram paralisadas em junho de 2022 pela empresa contratada para realizar a obra. Em março de 2023, a Petrobras assinou contrato com a empresa Toyo Setal Empreendimentos para conclusão das obras da Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), com previsão de conclusão para 2024.

Em dezembro de 2022, a Petrobras aprovou o projeto de engenharia das unidades de produção de combustíveis e lubrificantes no Pólo Gaslub, integrados à refinaria Reduc, em Duque de Caxias (RJ). Também está sendo analisada a viabilidade de construção de uma termelétrica. A companhia também anunciou a retomada dos investimentos em petroquímica, agora também com foco na transição energética. Pretende voltar a investir em refino, mas dessa vez para a produção de biocombustíveis, principalmente o diesel verde.

O governo do Rio de Janeiro, por sua vez, estuda reduzir a alíquota de ICMS para indústrias gás-intensivas interessadas em se instalar no Gaslub, mirando o potencial de atração de projetos de fertilizantes e distribuição de gás natural em pequena escala no polo, por exemplo.

De modo que tanto o planejamento de novos projetos voltados a combustíveis avançados pela Petrobrás quanto a retomada do COMPERJ (agora “Pólo Gaslub”) poderão criar sinergia com o desenvolvimento de um hub de hidrogênio verde junto ao Porto de Itaguaí.

A produção de amônia é o segundo mercado potencial para o desenvolvimento de projetos de hidrogênio. Como se sabe, a amônia é o insumo básico na produção de fertilizantes nitrogenados, sendo este mercado estratégico para o país, tendo em vista a alta escala de importação desse insumo, principalmente para a produção de grãos.

No entanto, como o preço do gás natural brasileiro – usado como insumo na produção de hidrogênio - é historicamente alto se comparado com os preços internacionais, o agronegócio importa hoje o equivalente a 85% dos volumes dos fertilizantes nitrogenados que utiliza.

A amônia também desponta como combustível da transição energética no transporte marítimo, podendo ser esta outra oportunidade para o porto. Nesse sentido, a *Yara International e a Azane Fuel Solutions* recentemente assinaram um acordo comercial para estabelecer uma rede de *bunkers* de combustível de navios à base de amônia verde na Escandinávia até 2024. Isso ocorre ao mesmo tempo em que a *Maersk, Keppel Offshore & Marine e Sumitomo Corporation* estudam a viabilidade do uso da amônia verde para estabelecer uma cadeia de suprimentos junto ao Porto de Cingapura, na Ásia, dentre outros portos.

Da mesma forma, a oportunidade de desenvolvimento de um bunker de amônia e metanol para o atendimento a embarcações são oportunidades a serem consideradas para o desenvolvimento de um *bunker* de combustíveis junto ao porto de Itaguaí.

Com efeito, a produção de metanol verde abriria diversos potenciais oportunidades de negócios no porto, não apenas para atendimento a empresas de navegação quanto também à indústria nacional, que hoje importa praticamente 100% do metanol que utiliza, principalmente para atendimento das indústrias de biodiesel e plástico.

Em face do exposto, como será detalhado no presente estudo, **a produção de hidrogênio verde para atendimento à indústria nacional, a produção de amônia para atendimento ao agronegócio e a produção de metanol são grandes oportunidades que se abrem ao Porto de Itaguaí e para os portos brasileiros em geral.**

Apresentaremos ainda uma estratégia para a geração de viabilidade econômica imediata para a produção de hidrogênio renovável e metanol verde junto ao porto, por meio da estruturação de uma planta de etanol de grande escala em sua retroárea, otimizando seus fluxos logísticos ferroviários e hidroviários.

As altas taxas de retorno geradas por este tipo de empreendimento privado poderiam custear tanto a produção de hidrogênio verde (via reforma do etanol, e não da eletrólise) quanto do metanol verde, a partir da captura do carbono gerada pela atividade de fermentação do milho, realizada na própria planta, sem necessidade de subsídios governamentais neste modelo de negócio.

Sendo assim, por ser um empreendimento autônomo e autofinanciado, a ser gerido em bases privadas, poderia posteriormente um projeto piloto deste tipo servir como modelo de negócio de produção de hidrogênio renovável em outros locais do mundo.

3. A INDÚSTRIA DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio verde, também conhecido como hidrogênio renovável, é uma molécula chave para o futuro dos sistemas de energia e desenvolvimento industrial. É produzido através da eletrólise da água usando eletricidade de fonte renovável (solar, eólica, hídrica etc.).

Ao contrário do hidrogênio cinza, que é produzido a partir de combustíveis fósseis (emitindo CO₂), o hidrogênio verde é uma alternativa limpa e sustentável de fonte de energia para a indústria. Tem potencial para descarbonizar o setor industrial intensivo em energia e contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. O hidrogênio verde pode ser usado como matéria-prima química, combustível e fonte de energia em várias indústrias, incluindo produção de aço, aplicações em transporte e aquecimento. Com o foco crescente na descarbonização e no avanço das tecnologias de energia renovável, espera-se que a demanda por hidrogênio verde cresça significativamente nas próximas décadas.

O hidrogênio verde tem uma ampla gama de aplicações em vários setores. Os principais usos do hidrogênio verde na atualidade são:

- **Processos Industriais:** O hidrogênio verde pode ser usado em processos industriais

como o refino do petróleo, produção de amônia e metanol. Também pode ser utilizado na produção de aço, fabricação de vidro e produção de tijolos e materiais de construção.

- **Geração de energia:** O hidrogênio verde pode ser usado como fonte de eletricidade não emissora de carbono. Ele pode ser convertido em outros combustíveis verdes, como metanol, metano e amônia, que podem ser usados para a geração de energia em turbinas a gás, motores, células de combustível e bombas de calor (após atividades de *cracking* da amônia verde, por exemplo).
- **Mobilidade e Transporte:** O hidrogênio verde pode ser usado como combustível para transporte, incluindo a aviação e o transporte marítimo, rodoviário e ferroviário. Pode ser usado em células de combustível para alimentar veículos e fornecer soluções de mobilidade limpa e sustentável.

O primeiro passo a ser dado antes da definição de um modelo de exploração ou projeto específico de desenvolvimento de um *cluster* de hidrogênio verde junto ao porto de Itaguaí é o mapeamento de oportunidades no setor, principalmente quanto a existência de potenciais compradores (*offtakers*) para o futuro hidrogênio a ser produzido, permitindo assim estimar-se a escala do novo empreendimento, produtos a serem desenvolvidos, desenho de estratégia de acesso a mercado, captação de investidores ou de linhas de financiamento (ou seja, estruturação do *funding* do empreendimento, segundo sua atratividade demonstrada na taxa de retorno estimada), bem como a definição de detalhes técnicos como o padrão tecnológico a ser adotado, definição do *EPC contractor*, da escala do projeto, logística a ser empregada etc.

Quanto ao mapeamento de oportunidades, conforme levantamento feito pela Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (AHK Rio de Janeiro), o quadro abaixo mostra o mercado existente (E) e potencial (P) de consumo do hidrogênio no Brasil:

Figura 2 – Mercado brasileiro do hidrogênio (cf Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro, AHK Rio 2021)

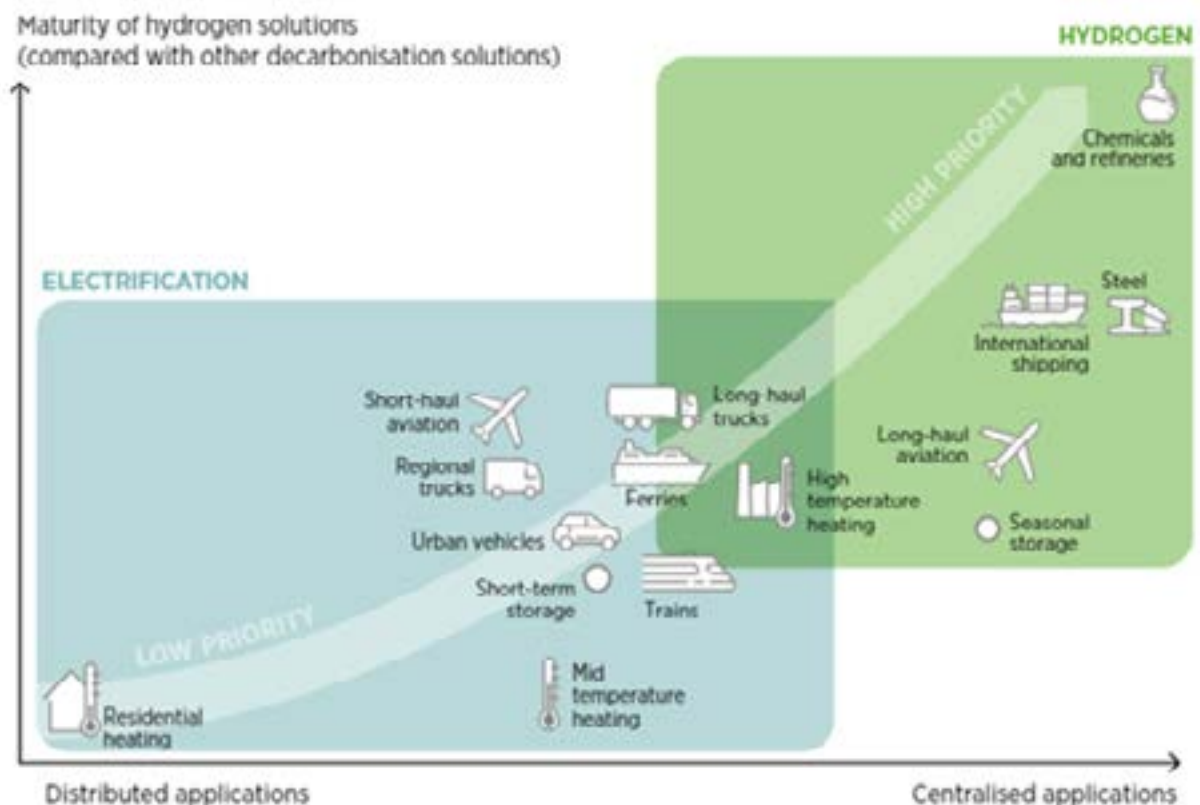
	Empresa	Setor	(E)xistente / (P)otencial	Site
1	Crista Margarina	Alimentação	E	http://cristamargarina.com.br
2	BRF	Alimentação	E	https://www.brf-global.com
3	Cimento ITAMBÉ	Cimento	P	www.cimentoitambe.com.br
4	Ciplan	Cimento	P	www.ciplan.com.br
5	Crh	Cimento	P	www.crhbrazil.com
6	Inter cement	Cimento	P	www.intercement.com
7	Lafargeholcim	Cimento	P	www.lafargeholcim.com
8	Mizu	Cimento	P	www.mizu.com.br
9	Tupi	Cimento	P	www.cimentotupi.com.br
10	Votorantim	Cimento	P	www.votorantimcimentos.com.br
11	Eletronuclear	Energia	E	https://www.eletronuclear.gov.br
12	Bahiagas	Energia	P	http://www.bahiagas.com.br
13	Cegás	Energia	P	http://www.cegas.com.br
14	Shelgas	Energia	P	http://www.shelgas.com.br
15	Naturgy	Energia	P	https://www.naturgy.com.br
16	Comgas	Energia	P	https://www.comgas.com.br
17	Bunge	Fertilizante	P	http://www.bunge.com.br
18	Cmoc Brasil Mineração, Indústria e Participações Ltda	Fertilizante	P	https://cmocbrasil.com/br
19	Vale Fertilizante	Fertilizante	P	http://www.vale.com/brasil
20	Herínger	Fertilizante	P	http://www.herínger.com.br
21	Iharabrás	Fertilizante	P	http://www.ihara.com.br
22	Mosaic Fertilizantes	Fertilizante	P	http://www.mosaicco.com.br
23	Fertipar	Fertilizante	P	https://www.fertipar.com.br
24	Yara Brasil	Fertilizante	P	https://www.yarabrazil.com.br
25	Galvani	Fertilizante	P	http://www.galvani.ind.br
26	Anglo American	Mineração	P	https://brasil.angloamerican.com
27	Mitsui & Co	Mineração	P	https://www.mitsui.com.br/pt
28	Vale	Mineração	P	www.vale.com
29	Braskem	Químico	E	https://www.braskem.com.br
30	Clariant	Químico	E	https://www.clariant.com/pt/Company
31	Oxiteno	Químico	E	http://www.oxiteno.com
32	Evonik Brasil Ltda.	Químico	E	https://central-south-america.evonik.com/pt
33	LANXESS	Químico	E	http://lanxess.com.br/pt/home
34	CSN	Siderurgia	E	www.csn.com.br
35	AceriorMittal	Siderurgia	E	https://brasil.arcelormittal.com
36	Gerdau	Siderurgia	E	www.gerdau.com.br
37	Ternium	Siderurgia	E	https://br.ternium.com/pt
38	Nicrosol	Siderurgia	E	http://www.nicrosol.com.br
39	CMA CGM	Transporte	P	https://www.cma-cgm.com/local/brasil

Fonte: Green Hydrogen for Industry.

4. A EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL: PROGRAMA GLOBAL DA UNIDO PARA O HIDROGÊNIO

A UNIDO, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial, lançou seu Programa Global para o Hidrogênio na Indústria (GPHI) para apoiar os países em desenvolvimento em sua transição para uma economia justa e sustentável do hidrogênio. O programa visa influenciar e orientar o desenvolvimento de políticas de mercado, padrões, instrumentos de financiamento e coordenação entre as principais partes interessadas. E também promover projetos tangíveis para acelerar a adoção do hidrogênio verde em indústrias de países em desenvolvimento e economias em processo de transição energética.

Figura 3 - Prioridade das políticas de hidrogênio verde



Fonte: IRENA (2020).

A UNIDO desenvolveu um modelo para clusters industriais de hidrogênio verde (GHIC). Esses clusters são definidos como regiões industriais ou clusters que compartilham hidrogênio

verde e eletricidade de energia renovável para vários fins, como produção de materiais, aquecimento e resfriamento, mobilidade local e matéria-prima industrial.

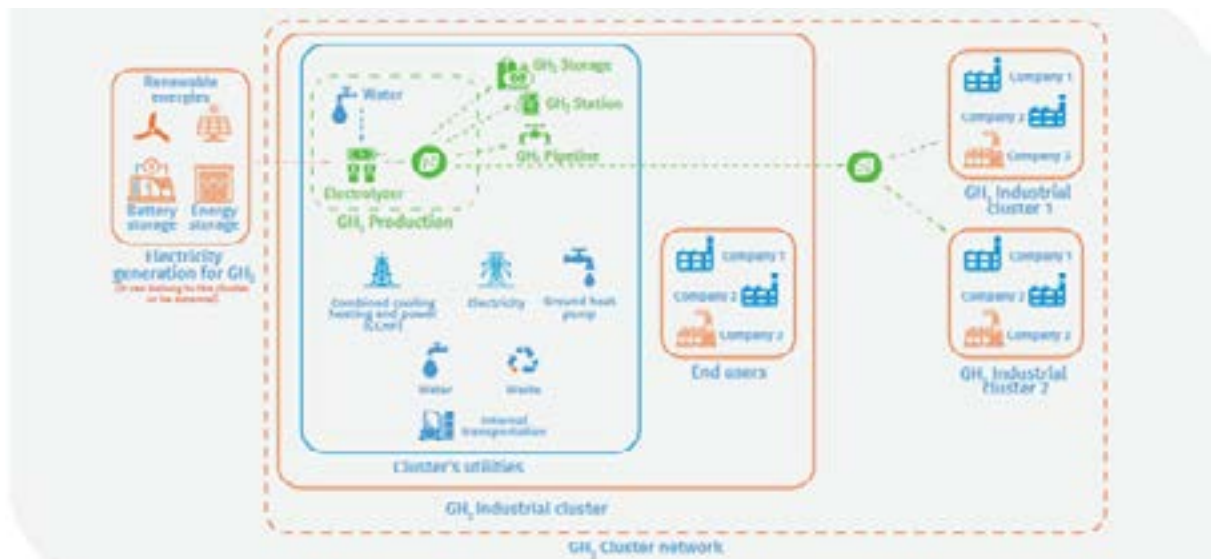
O modelo visa acelerar a aplicação de hidrogênio verde produzido localmente em zonas industriais, clusters e parques. Ele fornece orientação para governos e indústrias na preparação, implementação e ampliação de clusters industriais de hidrogênio verde. O modelo consiste em três fases: preparação, desenvolvimento de projetos-piloto e expansão da produção de hidrogênio verde dentro do cluster.

Tabela 1 – Fases do modelo para clusters industriais de hidrogênio verde (GHIC)

FASES	ATIVIDADES
Fase 1: Preparação dos Clusters de Hidrogênio Verde	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilização; • Envolvimento das partes interessadas; • Preparação do objetivo, estratégia e plano de trabalho de um cluster de hidrogênio verde; • Estudos de viabilidade; • Mobilização financeira.
Fase 2: Implantação de tecnologias para Hidrogênio Verde	<ul style="list-style-type: none"> • Comissionamento de projetos-piloto; • Produção, adaptação do processo e uso de hidrogênio verde em processo industrial; • Teste de projetos-piloto; • Operação comercial.
Fase 3: Aumentando a escala do uso de Hidrogênio Verde na indústria	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de captação e desafios; • Desenvolvimento de redes de hidrogênio verde.

Fonte: UNIDO (2023).

Figura 4 - Esquema geral de um cluster industrial de hidrogênio verde



Fonte: UNIDO (2023).

5. CARACTERÍSTICAS DOS CLUSTERS INDUSTRIAIS DE HIDROGÊNIO VERDE

Clusters Industriais de hidrogênio verde podem ser categorizados em dois tipos: *sites greenfield* e *sites brownfield*.

Greenfield Sites: *Greenfield sites* referem-se a novos clusters de produção que são construídos do zero. Estes clusters desenvolvem-se em zonas onde existe potencial para fontes de energia renováveis e para a produção de hidrogênio verde. *Sites greenfield* oferecem a oportunidade de estabelecer novos clusters industriais que podem contribuir para projetos sustentáveis, criar empregos e impulsionar empreendimentos com o uso de energia renovável.

Brownfield Sites: *Sites brownfield*, por outro lado, envolvem a transformação de clusters industriais existentes usando hidrogênio verde. Esses clusters utilizam e adaptam a infraestrutura existente para produzir e fornecer hidrogênio verde. Projetos *brownfield* são particularmente benéficos para indústrias de uso intensivo de energia, como produção de aço e amônia, pois o hidrogênio verde pode ajudar a descarbonizar seus processos.

Os projetos *greenfield* e *brownfield* têm o potencial de contribuir para o crescimento da indústria do hidrogênio verde e apoiar a transição para uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

5.1 Disponibilidade de fontes renováveis de eletricidade

A disponibilidade de eletricidade renovável é crucial para um cluster industrial de hidrogênio verde. Recomenda-se a abundância e acessibilidade de fontes de energia renováveis, como energia hidrelétrica, eólica e solar. Uma combinação dessas fontes pode garantir a estabilidade do abastecimento. Também é incentivada a conexão direta entre instalações Power-to-X (PtX) e fontes de energia renováveis.

A proximidade de fontes de energia renováveis ao cluster industrial é preferida para evitar perdas de eficiência e permitir a documentação de origem. Idealmente, a energia renovável deve ser diretamente conectada ao cluster industrial e verticalmente integrada ao cluster para aumentar a eficiência da entrega e a viabilidade econômica.

5.2 Localização e acesso a utilidades e instalações auxiliares

Para garantir o sucesso da produção e utilização de hidrogênio verde, certos requisitos de infraestrutura precisam ser atendidos, incluindo:

Distribuição interna de eletricidade: O cluster deve ter um sistema de distribuição de eletricidade bem estabelecido, incluindo armazenamento de energia e estações de transformação, se diretamente conectado a fontes de energia renováveis.

Produção, distribuição e armazenamento de calor: A infraestrutura para gerenciamento de calor é crucial, incluindo sistemas para produção, distribuição e armazenamento de calor em altas e baixas temperaturas.

Água de processo e tratamento de águas residuais: Instalações adequadas para tratamento e distribuição de água de processo e gerenciamento de águas residuais são necessárias para apoiar a produção de hidrogênio verde.

Captura e utilização de carbono (CCU): A infraestrutura para captura, fornecimento, transporte e distribuição de CO₂ é essencial para os processos de captura e utilização de carbono na produção de hidrogênio verde.

Áreas de distribuição, armazenamento e tanques de hidrogênio: O cluster deve ter uma infraestrutura bem desenvolvida para distribuição, armazenamento e gerenciamento do uso do hidrogênio ou outros gases usados em processos industriais.

Infraestrutura para armazenamento e transporte de oxigênio: Caso o oxigênio seja utilizado em outros processos ou vendido para outras empresas, o cluster deve possuir a infraestrutura necessária para seu armazenamento e transporte.

Esses requisitos de infraestrutura são vitais para vincular a produção e o uso final de hidrogênio verde dentro do cluster industrial. Eles garantem a utilização eficiente e eficaz dos recursos e apoiam a sustentabilidade geral do cluster.

5.3 Composição, escala e sinergias

Utilizar sinergias em ambientes industriais com uso intensivo de energia pode ajudar a reduzir os custos da produção de hidrogênio verde e tornar o preço do hidrogênio verde e de outros combustíveis competitivo. Essas sinergias podem ser alcançadas aproveitando os parques industriais existentes com altas demandas de energia ou excesso de energia, otimizando a infraestrutura de energia existente, como usinas combinadas de calor e energia, em arranjos de

economia circular.

Converter ou integrar esses empreendimentos em clusters industriais de hidrogênio verde pode ser uma medida estratégica, especialmente para entidades que atualmente dependem de hidrogênio ou energia de origem fóssil em suas atividades. No caso do GreenLab, essa infraestrutura faz parte do conceito “*Facility as a Service*”, que reduz as despesas de capital e operacionais para grupos industriais com este perfil. O gerenciamento eficaz dos clientes e *stakeholders* é crucial para o sucesso desses empreendimentos e deve ser priorizado.

5.4 Estudo de caso: GreenLab Skive (Greenfield site)

O GreenLab Skive fica em uma área rural da Dinamarca. A localização é ideal para testar a conversão de energia e integração de sistemas, por estar próximo da rede elétrica nacional de 150 kV e do gasoduto de 40 bar que atende a região. Uma indústria de 60 hectares está a ser construído nesta área, como um projeto greenfield, integrando empresas criteriosamente selecionadas com o objetivo de contribuir para a transição verde.

O modelo GreenLab procura converter recursos naturais em cadeias de valor – internamente, usando fluxos de energia (graças à co-localização de empreendimentos com produção e consumo de hidrogênio), e externamente, através da produção de combustíveis verdes, permitindo a descarbonização de diferentes setores por diferentes rotas.

Figura 5 - Visão geral do Cluster Industrial GreenLab Skive



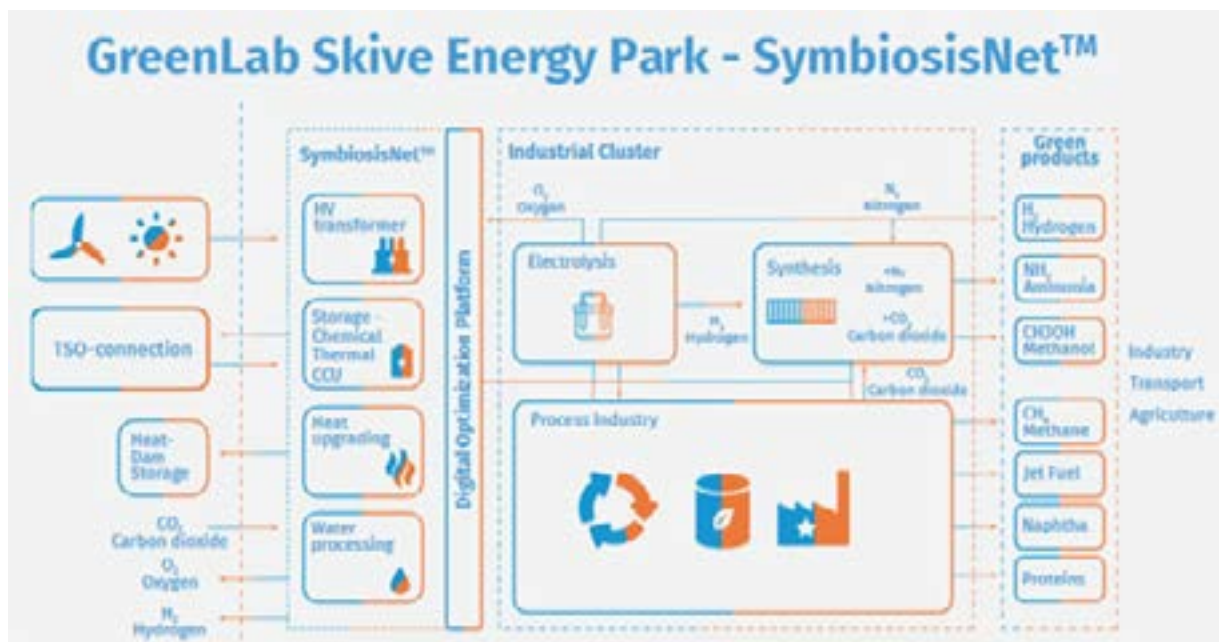
Fonte: UNIDO (2023).

O Cluster Industrial GreenLab Skive é composto por:

- Um fornecedor de energia renovável que fornece 80 MW de energia eólica e solar, com essas fontes conectadas diretamente.
- Uma grande usina que produz biogás/biometano a partir de esterco e resíduos provenientes de diferentes unidades de produção.
- Duas empresas de processo de pirólise que utilizam o hidrogênio verde.
- Gás de síntese originado de plásticos em fim de vida, além de outros produtos biológicos agrícolas residuais para produzir biocarbono.
- Uma empresa que produz rações ricas em proteínas obtidas em fontes locais de resíduos marinhos.
- Uma instalação municipal de tratamento de resíduos.
- Uma fábrica que produz papel e papelão de alta densidade sem colas ou resinas de aparas.
- Dois projetos pioneiros de hidrogênio verde e Power-to-X começarão a operar nos próximos anos com uma capacidade do eletrolisador de 112 MW; a capacidade potencial do eletrolisador poderá chegar em 400 MW, com mais projetos em andamento.

A GreenLab estabelece e gerencia a infraestrutura de cluster e utilitários para seus clientes por meio do SymbiosisNet™.

Figura 6 - Diagrama GreenLab Skive Energy Park



Fonte: UNIDO (2023).

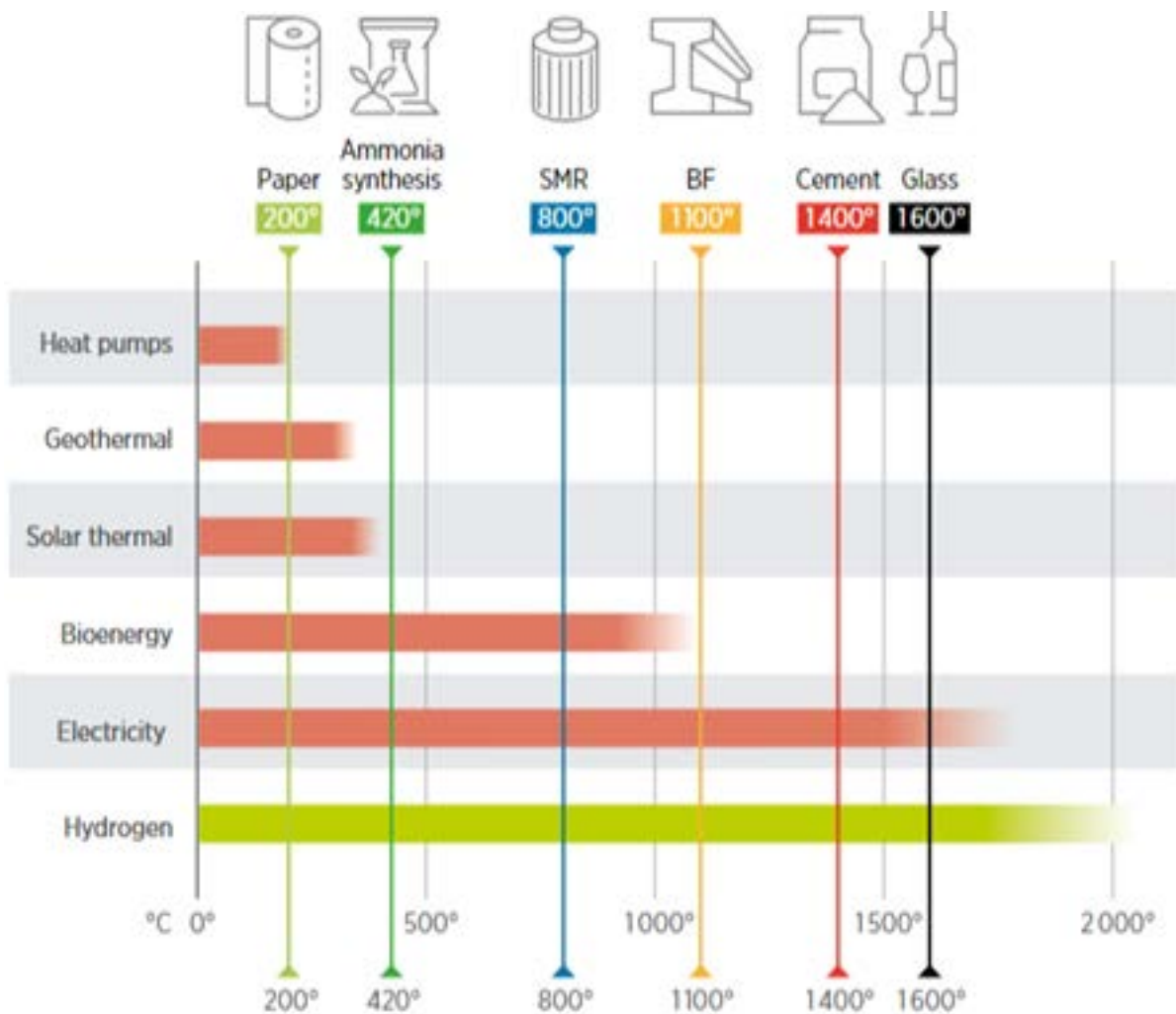
6. VISÃO GERAL DOS USOS DO HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde pode ser utilizado em diversas aplicações, substituindo o hidrogênio cinza e até mesmo o gás natural. Tem potencial para ser usado em indústrias como química, energia, mobilidade e transportes.

Os usos atuais do hidrogênio incluem refino, produção de amônia e metanol, e pode ser usado na produção de aço, transporte e geração de calor no futuro. Estão em andamento investigações para explorar o uso de hidrogênio em outros setores, como fabricação de vidro, produção de tijolos e materiais de construção.

As principais aplicações do hidrogênio são na produção industrial, pois alguns processos não podem ser eletrificados diretamente com as tecnologias atuais. Portanto, clusters industriais podem se deslocar para áreas com recursos renováveis abundantes.

Figura 7 - Temperaturas de trabalho para tecnologias de calor renovável selecionadas

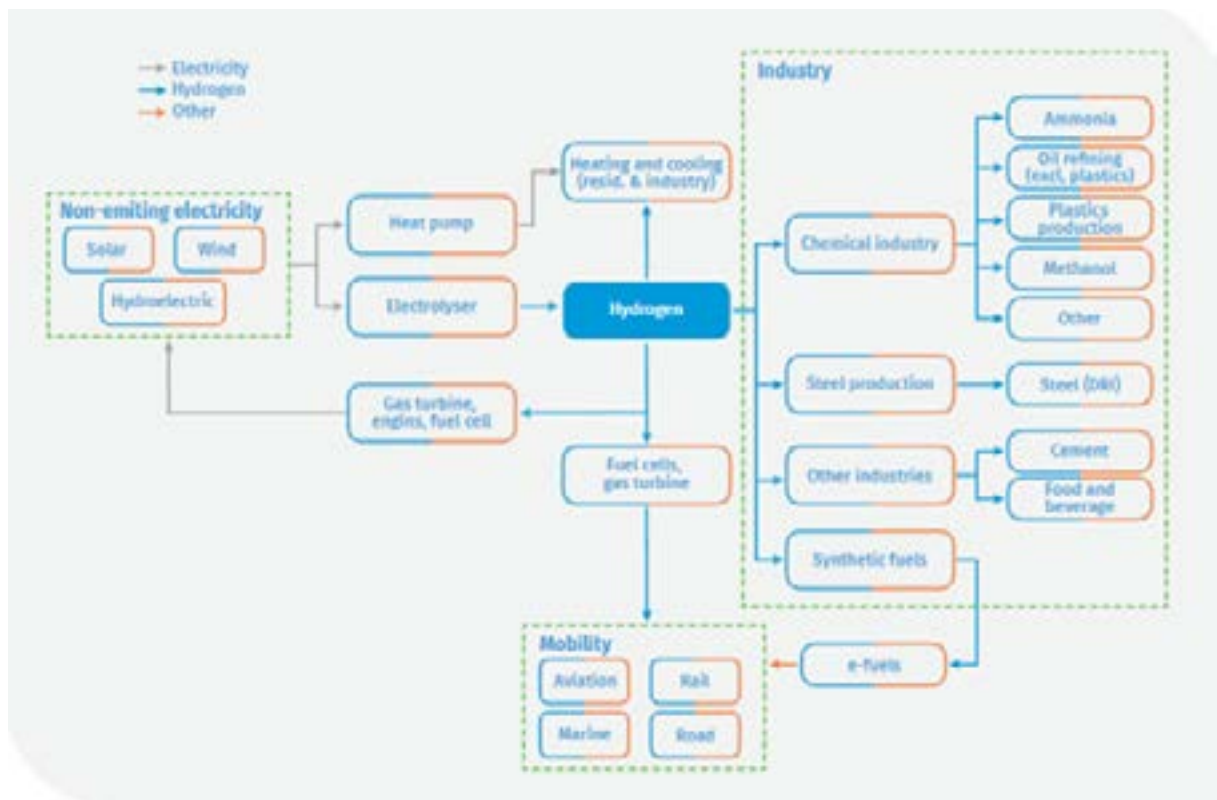


Fonte: IRENA (2022).

Como já informado, o hidrogênio verde tem uma ampla gama de aplicações em vários setores. Pode ser usado como matéria-prima para a produção de produtos químicos, como fonte para processos de alta temperatura e como combustível para transporte.

No setor industrial, o hidrogênio verde já está sendo usado em refino de petróleo, produção de amônia e produção de metanol. Também tem potencial para ser usado na produção de aço, geração de calor e outros processos industriais. Espera-se que o uso de hidrogênio verde na indústria aumente no futuro, à medida em que os países comecem a descarbonizar suas economias e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Figura 8 - Visão geral de possíveis casos de uso para o hidrogênio verde



Fonte: UNIDO (2023).

6.1 Hidrogênio no setor industrial

A produção de aço verde à base de hidrogênio é considerada uma tecnologia-chave para alcançar uma indústria de aço neutra em carbono. É tecnicamente viável e vista como solução de longo prazo para descarbonização da indústria siderúrgica em larga escala.

A produção primária de ferro pode ocorrer por duas vias: Alto-forno (BF) (1291 Mt) e

ferro reduzido direto (DRI) (1,8 Mt). Em ambos os casos, o minério de ferro é reduzido quimicamente. Isso significa remover o oxigênio, CO₂ ou água presentes no metal. Grandes quantidades de energia são necessárias para isso, mas mais importante, um transportador de energia é necessário para reagir quimicamente com o oxigênio. A rota BF utiliza carvão tratado (coque) empilhado juntamente com o minério na fornalha. Portanto, ele só pode usar limitadas quantidades de hidrogênio adicionado (10-20%), com o carvão também cumprindo um propósito estrutural no processo. Isso significa que a rota BF não pode ser totalmente descarbonizada com hidrogênio verde. A rota DRI usa um gás redutor (por exemplo, monóxido de carbono derivado do gás natural para reduzir aglomerados de minério de ferro). O hidrogênio verde pode substituir esses gases redutores fósseis com relativa facilidade.

O hidrogênio pode ser usado como um substituto redutor para produzir DRI, que pode então ser transformado em aço em um forno elétrico a arco (EAF). O gás natural é atualmente usado como redutor nesta rota DRI ou EAF por indústrias no Oriente Médio que têm acesso a um suprimento barato de gás natural. No entanto, embora a injeção de hidrogênio verde nos alto-fornos possa reduzir as emissões de carbono em até 20%, isso não oferece produção de aço carbono neutro porque o carvão coqueificável regular ainda é um agente redutor necessário no alto-forno.

A tecnologia DRI *Smelting Furnace* substituirá os altos-fornos com 80-90% de emissão de CO₂ evitada quando o hidrogênio verde e energia renovável forem usados. Esta é uma solução ideal para o tratamento do minério de ferro nos alto-fornos devido ao alto volume de escória derivado do processo.

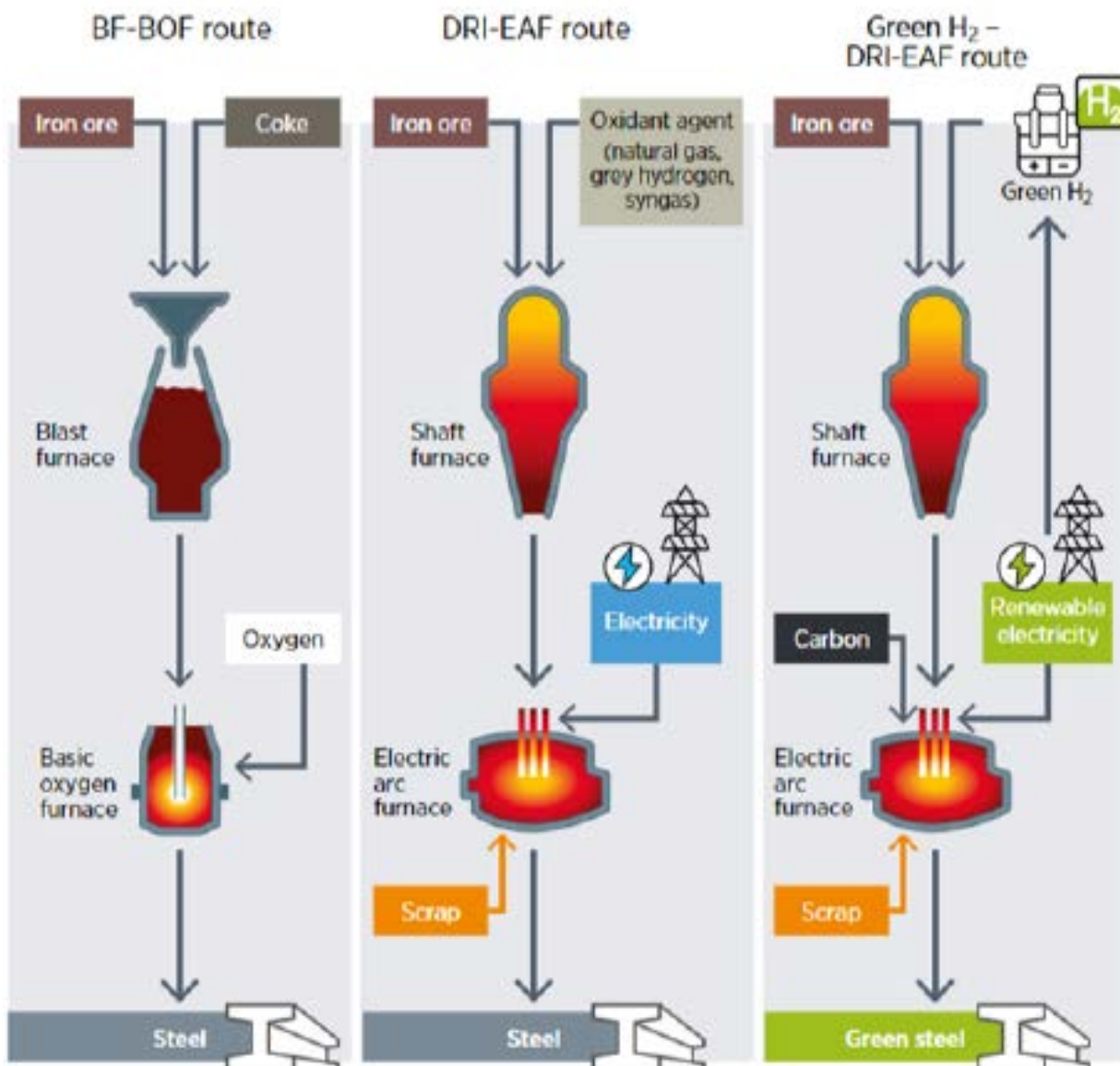
A indústria siderúrgica na Europa enfrenta um desafio de descarbonização devido à pressão para reduzir sua pegada de carbono. Para garantir a futura produção de aço na Europa, a adoção da produção de aço à base de hidrogênio provavelmente será uma tecnologia-chave. Isso pode envolver a otimização dos processos BF/BOF, a mudança para EAF usando sucata e DRI alimentados com gás natural ou HBI importado e, finalmente, a produção EAF neutra em carbono usando uma mistura de sucata e DRI à base de hidrogênio. A mistura de sucata *versus* produção baseada em DRI usando EAFs dependerá de futuros portfólios de produtos.

O uso de hidrogênio no método DRI permitirá a produção de aços de alta pureza sem emissão de dióxido de carbono. A implementação de medidas de descarbonização, como a produção de aço à base de hidrogênio, pode ser feita em instalações novas e existentes, com modernização ou reconstrução completa como opções. As etapas ideais para a descarbonização variam dependendo de fatores como a viabilidade técnica, infraestrutura existente, demandas

do mercado, custos operacionais e ambiente regulatório. No geral, o caminho potencial para os players de aço na Europa envolverá uma mudança gradual em direção à descarbonização por meio da adoção da produção de aço baseada em hidrogênio verde.

Esta transformação para aço à base de hidrogênio possui os seus desafios, como fornecimento de energia, segurança no fornecimento de hidrogênio, disposição a pagar e regulamentação do processo. A disponibilidade de energia barata a partir de fontes renováveis e regulamentações favoráveis serão fatores cruciais para a adoção do aço à base de hidrogênio. Espera-se que a mudança para a produção de aço à base de hidrogênio ocorra gradualmente entre 2030 e 2040 na Europa, substituindo a atual rota BOF integrada por configurações DRI e EAF.

Figura 9 - Principais rotas de produção de aço



Fonte: IRENA (2022).

6.2 A Estudo de Caso: Desenvolvimento de projetos de aço verde: lições aprendidas com H2 Green Steel (H2GS)

Durante o verão de 2022, a H2GS iniciou a preparação do terreno para seu primeiro projeto em Boden, Suécia, onde ela pretende construir uma unidade de produção de hidrogênio verde em grande escala para apoiar uma planta de aço verde integrada.

A produção está prevista para começar em 2025. Até 2030, a H2GS pretende atingir uma capacidade de produção de cinco milhões de toneladas de aço de alta qualidade. O foco do uso de hidrogênio verde da H2GS será reduzir o minério de ferro a ferro reduzido diretamente (DRI). O uso do hidrogênio em vez de carvão de coque reduz as emissões de CO₂ do processo de redução em mais de 90% em comparação com o processo tradicional de fabricação de ferro. No processo siderúrgico tradicional, a redução do minério de ferro ocorre em um alto-forno, por meio da combinação do minério com o carvão de coque em altas temperaturas. Isso desencadeia uma reação química que separa o oxigênio do ferro, formando e emitindo grandes quantidades de CO₂. Já no processo de produção H2GS, o hidrogênio verde é usado como agente redutor, resultando assim em emissões de vapor de água em vez de CO₂.

O DRI é então alimentado no Forno de Arco Elétrico (EAF), onde a eletricidade renovável aquece uma combinação de DRI e sucata de aço. Durante o processo contínuo de lingotamento e laminação, o aço líquido é convertido em produtos sólidos.

A planta é totalmente integrada em cada reação da cadeia de produção, limitando-se a quantidade de energia usada no processamento, armazenamento e manuseio de materiais.

A H2GS segue um processo de 5 etapas para alcançar a produção de aço verde:

Etapa 1: Eletrólise em Giga-escala - Usando eletricidade livre de fósseis para decompor a água em hidrogênio com foco em produzir hidrogênio suficiente para produzir 5 milhões de toneladas de aço de alta qualidade anualmente até 2030.

Etapa 2: Redução Direta Baseada em Hidrogênio - Usando hidrogênio verde em vez de carvão ou gás natural para reagir com oxigênio em pastilhas de óxido de ferro para produzir ferro reduzido direto (DRI) altamente metalizado para siderurgia com vapor como resíduo, reduzindo assim as emissões de CO₂ em mais de 95%.

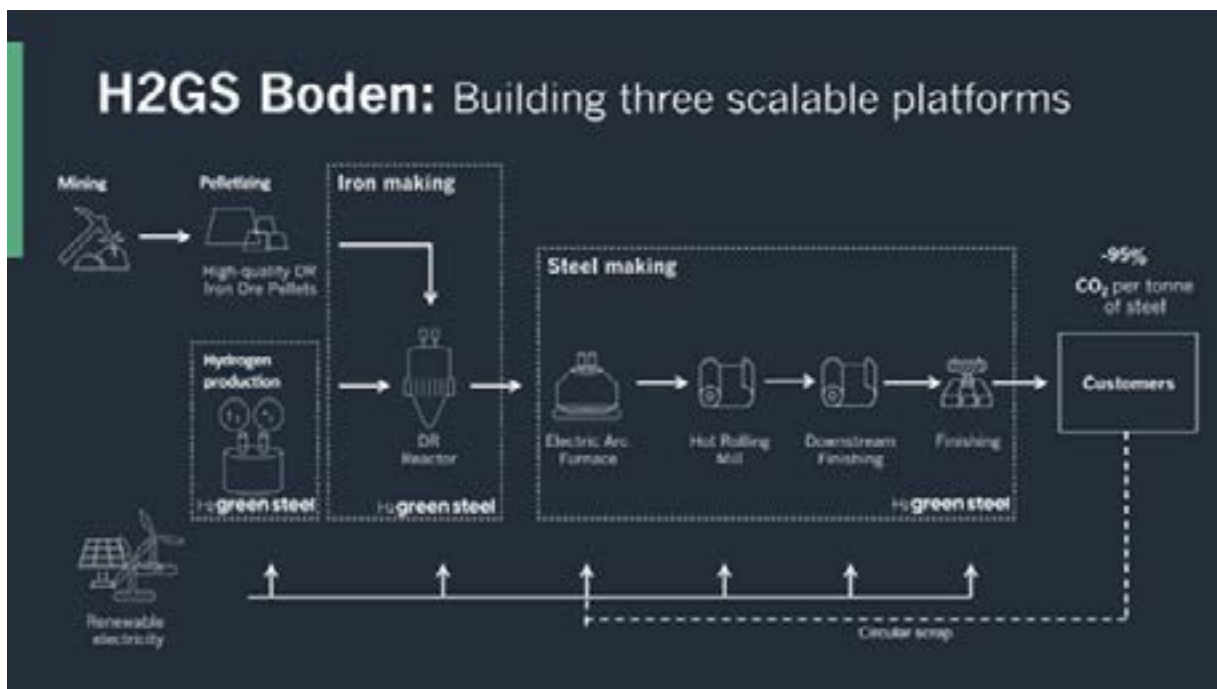
Etapa 3: Forno elétrico a arco (EAF) na siderurgia – Usando eletricidade livre de fósseis para aquecer DRI e sucata de aço para criar aço líquido, com o carbono contido na escória desempenhando um papel importante na redução do consumo de eletricidade, permitindo a

transformação de ferro em aço.

Etapa 4: Fundição Contínua e Laminação – Permitindo reduzir o consumo de energia em 70% e substituindo o gás natural no processo tradicional.

Etapa 5: Linhas de acabamento a jusante – Processos de laminação a frio, recozimento e galvanização por imersão a quente para ajustar a espessura do aço, criando as propriedades mecânicas desejadas e protegendo contra a corrosão.

Figura 10 - Visão geral da produção de aço utilizando o hidrogênio verde



Fonte: H2GS Boden

Um dos desafios mais cruciais para a descarbonização de indústrias de difícil redução é o acesso à eletricidade e à infraestrutura relacionada. As etapas mais intensivas em eletricidade na produção de aço verde são a produção de hidrogênio e o reator DRI.

Portanto, a parte mais intensiva em eletricidade do aço verde industrial pode ser vantajosamente localizada em regiões com altos níveis de produção de eletricidade renovável, ou com potencial para desenvolver ainda mais ativos de energia renovável de baixo custo.

Outro desafio é a diferença de custo e preço entre a produção de aço tradicional e os custos do aço verde.

Muitos clientes nos setores automotivo, de construção e outros estão dispostos a pagar um prêmio por um produto verde. Para acelerar e aumentar a demanda por aço verde, existem algumas questões políticas que devem ser considerados globalmente, entre elas:

- Um preço para as emissões de gases de efeito estufa precisa ser introduzido em todo o mundo.
- Mercados com preços mais altos para emissões de GEE podem apoiar um mecanismo de ajuste de fronteiras para nivelamento dos custos.
- Os países pioneiros podem atuar como facilitadores e desempenhar um papel importante na introdução de um padrão harmonizado ambicioso para ação com emissões líquidas zero de carbono e seus respectivos prêmios.

6.3 Hidrogênio na indústria química

Na indústria química, o hidrogênio já é usado como componente crucial na produção de amônia, metanol e outros produtos químicos. Portanto, a integração do hidrogênio verde nesses processos requer modificações mínimas.

A única mudança necessária é passar da obtenção de hidrogênio através da reforma de combustíveis fósseis ou gaseificação para a eletrólise da água. Isso significa que, em vez de usar combustíveis fósseis, o processo usaria fontes de energia renováveis para produzir hidrogênio, tornando-o uma opção mais sustentável e ecologicamente correta.

Como já informado, quanto ao **desenvolvimento de oportunidades de negócio para o novo cluster de hidrogênio a ser desenvolvido junto ao porto no setor petroquímico, importante se torna o acesso aos planos de desenvolvimento da Petrobrás no setor, inclusive no que se refere ao antigo COMPERJ, atualmente rebatizado como pólo Gaslub, que poderá gerar sinergias com as empresas e terminais instalados junto ao Complexo Portuário de Itaguaí, principalmente quanto ao desenvolvimento do mercado de combustíveis avançados e combustíveis sintéticos no Brasil.**

Importância também deve ser dada ao potencial desenvolvimento de novos projetos de energia solar e parques aerogeradores *offshore* ou *onshore* na área de influência do porto, que poderia vir a gerar viabilidade econômica para novos projetos junto a este porto.

6.4 Amônia

A amônia é produzida a partir de hidrogênio e nitrogênio e é a segunda commodity química mais produzida globalmente. Em 2020, a produção global de amônia ultrapassou 183 Mt. Os fabricantes de fertilizantes são os maiores consumidores de amônia, respondendo por mais

de 85% da produção global. O setor agrícola é o principal consumidor de amônia (Brightling, 2018). Para cada 1 kg de amônia, são necessários aproximadamente 0,18 kg de hidrogênio.

Na síntese da amônia, o hidrogênio empregado é atualmente baseado em combustíveis fósseis, geralmente utilizando-se a reforma do metano a vapor.

Espera-se que a demanda por amônia aumente devido ao crescimento da população global, bem como seu uso potencial no transporte marítimo internacional e na geração de energia.

Até 2050, a demanda por amônia está projetada para atingir quase 600 Mt. Cerca de 55% dessa demanda poderá ser atendida com hidrogênio verde, que é produzido por eletrólise da água em vez de reforma ou gaseificação de combustível fóssil (IRENA, 2021b; Saygin e Gielen, 2021).

Como já informado, as atuais plantas de produção de amônia normalmente usam hidrogênio obtido da reforma do metano a vapor (SMR), que é responsável por 90% das emissões de CO₂ associadas à produção de amônia. Para alcançar uma descarbonização profunda, a produção de amônia precisa fazer a transição para o hidrogênio verde.

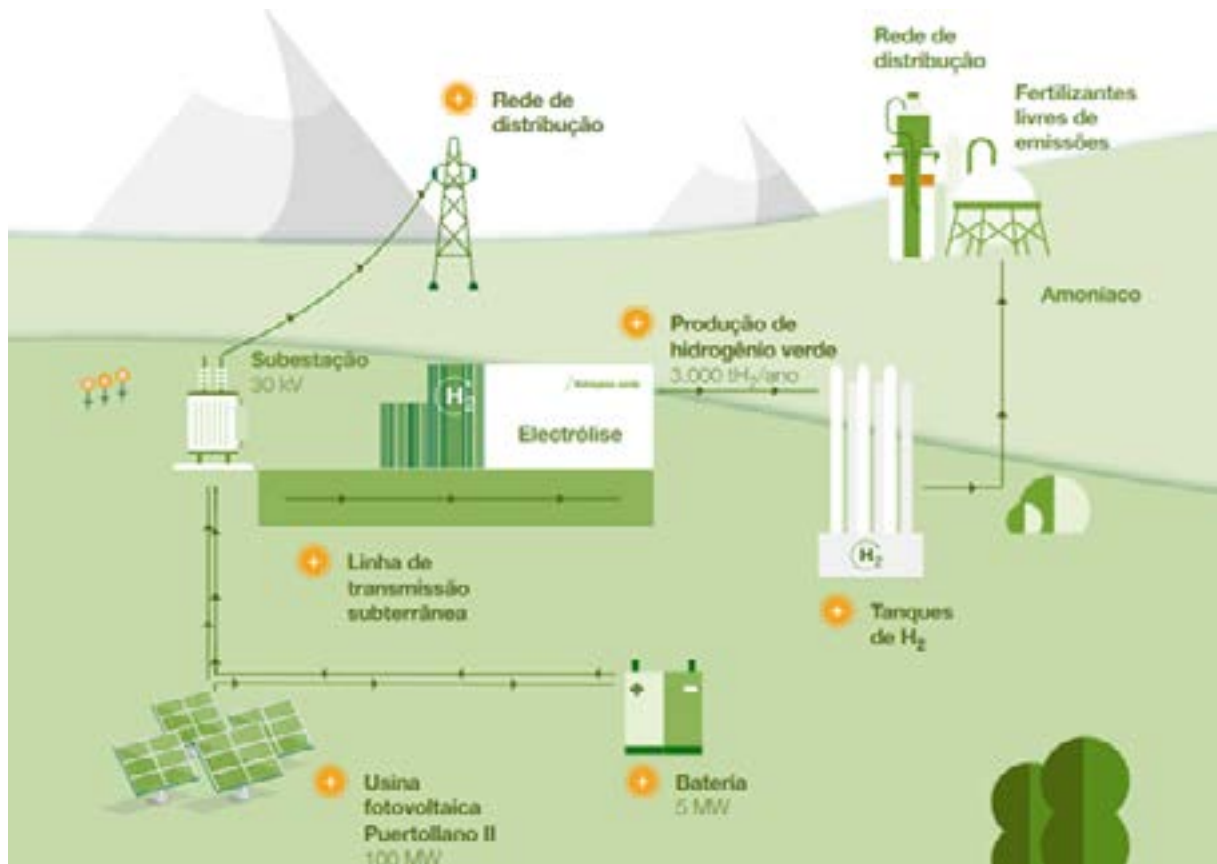
No entanto, é importante observar que a energia renovável também é necessária para alimentar os demais processos necessários para a produção de amônia, para que seja verdadeiramente zero carbono (The Royal Society, 2020).

6.4.1 Projetos de produção de hidrogênio verde e amônia: lições aprendidas com a Ammonia Association

A *Ammonia Association* destaca a importância da produção de amônia com baixo teor de carbono para descarbonizar os mercados atuais e atender à demanda futura. Atualmente, existem alguns projetos em desenvolvimento no mundo. Um exemplo é a descarbonização parcial da fábrica de fertilizantes da Fertiberia em Puertollano, na Espanha, que visa produzir hidrogênio e amônia renováveis.

Outro projeto significativo é a planta de amônia que está sendo desenvolvida pela *Ammonia Energy*, NEOM, Yara e Fertiberia na Arábia Saudita, que planeja produzir amônia renovável usando energia eólica e solar. Esses projetos demonstram o potencial do emprego do hidrogênio verde em grande escala na produção de amônia verde.

Figura 11 - Infográfico da usina de amônia verde



Fonte: IBERDROLA.

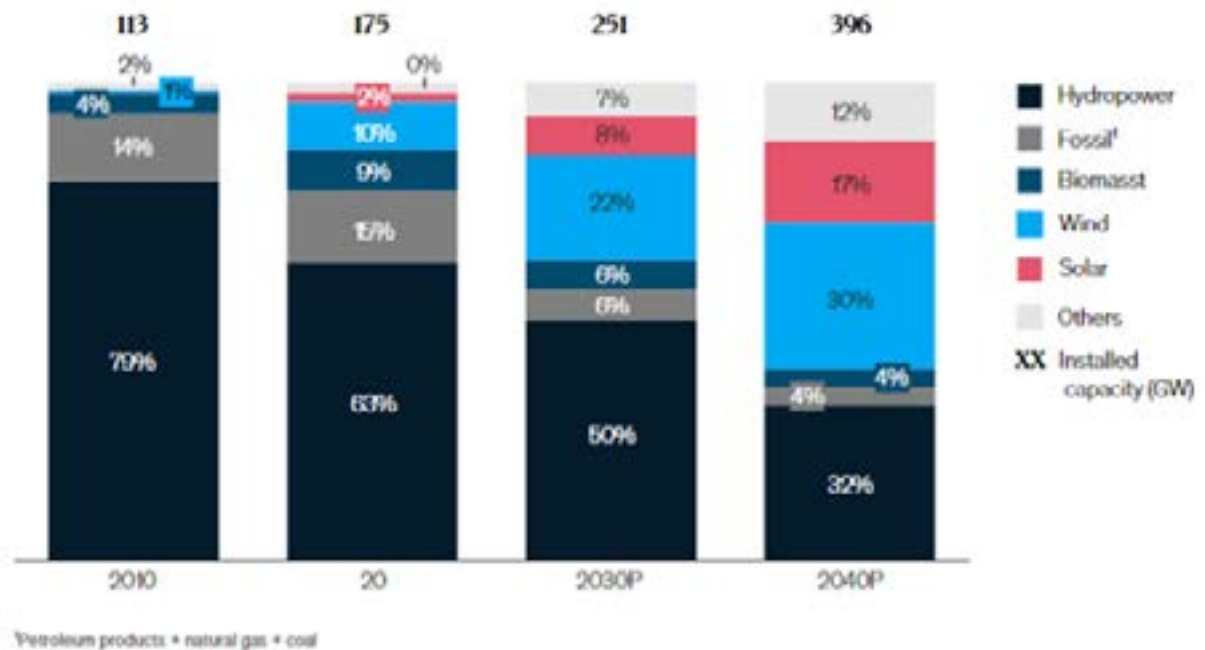
6.4.2 Oportunidade nacional no mercado amônia

De acordo com a McKinsey, o Brasil tem potencial para se tornar um líder global na produção de hidrogênio verde devido aos seus abundantes recursos de energia eólica e solar, rede elétrica integrada de baixo carbono e localização geográfica favorável para exportação para a Europa e América do Norte. É estimado que o Brasil possa gerar de US\$ 4 a US\$ 6 bilhões com a exportação de derivados verdes de hidrogênio para os EUA e Europa.

De acordo com a agência de consultoria, as características que qualificam o Brasil como um possível líder global na exportação de amônia verde são:

Fontes abundantes de energia renovável: o Brasil tem uma vantagem significativa na exportação de amônia verde devido à abundância de fontes renováveis de energia, incluindo energia eólica e solar. Com 85% de sua energia proveniente de fontes renováveis, o Brasil pode produzir amônia verde usando energia limpa, tornando-se uma opção atraente para países que buscam reduzir sua pegada de carbono, por meio do cracking da amônia para produção de energia.

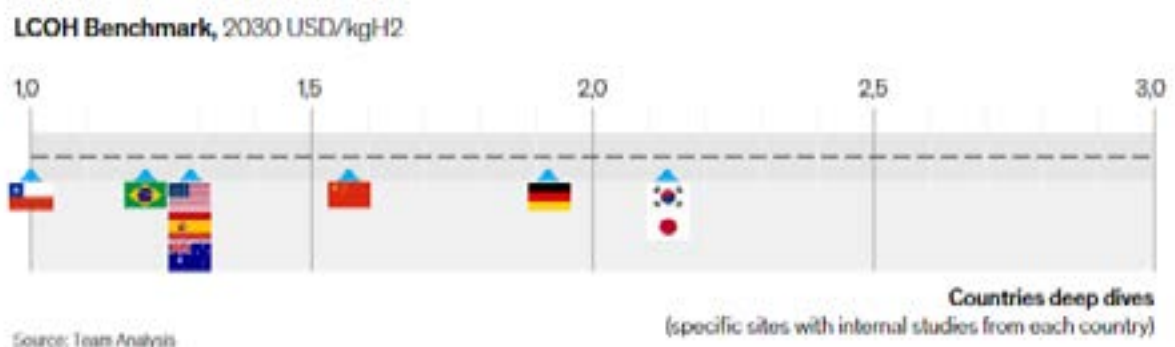
Figura 12 - Capacidade instalada de eletricidade do Brasil por tipo de fonte (%)



Fonte: McKinsey & Company (2021).

Custos de importação competitivos: Espera-se que os custos de importação da amônia verde brasileira sejam competitivos em comparação com as exportações de outros países. Essa competitividade de custos é fundamental para atrair mercados internacionais e consolidar o Brasil como um dos principais exportadores de amônia verde.

Figura 13 - Projeção da vantagem competitiva do Brasil nas Exportações de Hidrogênio Verde em 2030



Fonte: McKinsey & Company (2021).

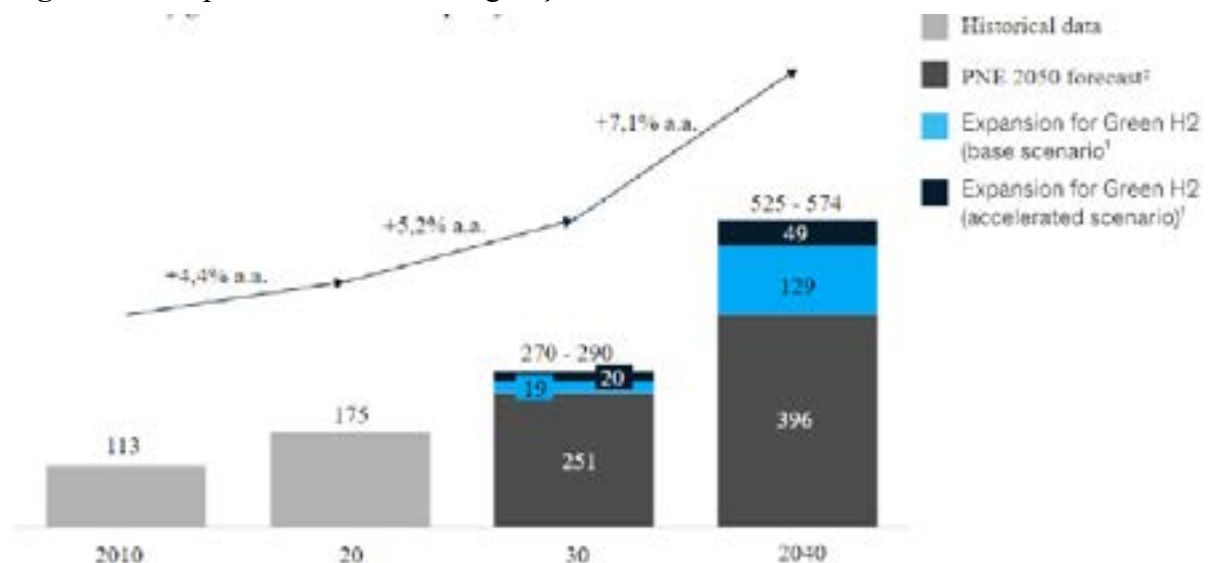
Vantagem Geográfica: A localização geográfica do Brasil oferece uma vantagem para a exportação de amônia verde para outros países. Com sua proximidade com a Europa e a costa

leste da América do Norte, o Brasil poderá transportar amônia verde com eficiência para esses grandes mercados, reduzindo custos de transporte e aumentando seu potencial de exportação.

Oportunidade para descarbonização: A amônia verde é uma alternativa de baixo carbono à amônia cinza, que é tradicionalmente produzida a partir de combustíveis fósseis. À medida em que os países se esforçam para descarbonizar suas indústrias, a amônia verde se torna uma opção valiosa para setores como fertilizantes e produtos químicos. A capacidade do Brasil de produzir amônia verde o posiciona como um ator-chave no atendimento da demanda global por soluções sustentáveis de baixo carbono.

Investimento em Hidrogênio Verde: Para liberar totalmente o potencial de exportação de amônia verde, o Brasil precisa investir na produção de hidrogênio verde. Este investimento inclui geração adicional de energia renovável, que aumentará ainda mais a capacidade do Brasil de produzir amônia verde e atender à crescente demanda dos mercados internacionais.

Figura 14 - Capacidade instalada de geração de eletricidade no Brasil GW



1 Considera 70%/30% capacity between Solar and Wind to attend the base and accelerated scenarios for Green H2 demand (11 and 22.54 tonnes in 2040)
 2 Scenario "Expansion without emission sources"
 3 Mapped onshore wind power potential in Brazil, considering 100m turbines
 4 Mapped centralized solar power potential in Brazil, considering only areas with highest solar incidences (6.000 - 6.200 kWh/m²/day) - Total in Brazil can surpass 25 TW

Fonte: McKinsey & Company (2021).

6.5 Metanol

O metanol é atualmente um componente importante na indústria química, sendo produzido principalmente a partir de combustíveis fósseis. No entanto, o mercado europeu iniciou um movimento de transição para o consumo do metanol renovável, que pode ser derivado da

biomassa ou sintetizado usando hidrogênio verde e dióxido de carbono (CO₂).

Essa transição tem expandido o uso de metanol como matéria-prima química e combustível, ao mesmo tempo em que tem ajudado no atingimento de metas líquidas neutras em carbono nos setores industrial e de transportes.

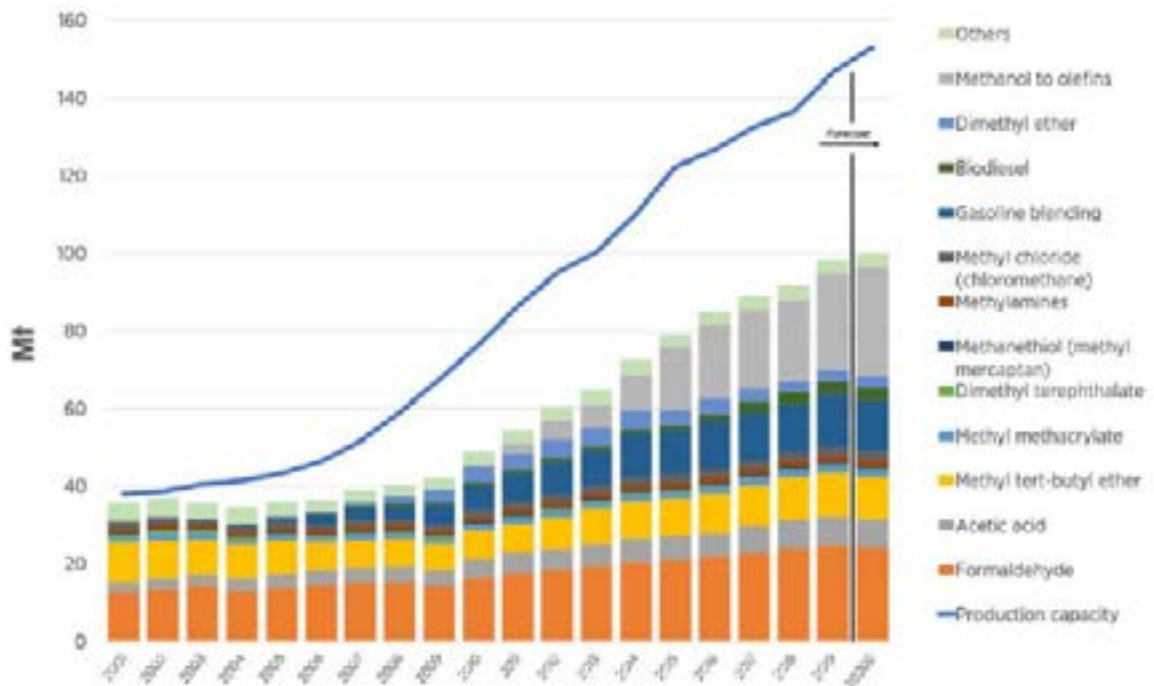
Neste sentido, embora o custo de produção do metanol renovável seja atualmente muito elevado e os volumes de produção sejam baixos, espera-se que, com as políticas corretas implementadas, o metanol renovável possa se tornar competitivo em custos até 2040.

A indústria do metanol abrange todo o globo, com produção na Ásia, América do Norte e do Sul, Europa, África e Oriente Médio. Em todo o mundo, mais de 90 usinas de metanol têm uma capacidade de produção combinada de cerca de 110 milhões de toneladas métricas (quase 36,6 bilhões de galões ou 138 bilhões de litros).

Em 2021, o mercado global de metanol foi avaliado em mais de 37,4 bilhões de dólares americanos, estando projetado para atingir quase 61,7 bilhões de dólares americanos até 2030. Essa indústria gera \$55 bilhões em atividade econômica a cada ano, criando mais de 90.000 empregos em todo o mundo.

As emissões do ciclo de vida da atual produção e uso de metanol chega a aproximadamente 0,3 gigatoneladas (Gt) de CO₂ por ano, o que representa cerca de 10% das emissões totais do setor químico. A produção de metanol quase dobrou na última década, com crescimento significativo observado na China. Se as tendências atuais continuarem, a produção poderá chegar a 500 milhões de toneladas por ano até 2050, resultando na liberação de 1,5 Gt de CO₂ anualmente, provenientes exclusivamente de combustíveis fósseis.

Figura 15 - Demanda Global de Metanol e capacidade produtiva (2001-2019)



Fonte: MMSA

6.5.1 Produção de Metanol Renovável

O metanol é produzido principalmente a partir de combustíveis fósseis, mas também pode ser produzido a partir de outras matérias-primas contendo carbono, como biomassa, biogás, fluxos de resíduos e CO₂ capturado de gases de combustão ou por meio de captura direta de ar (DAC).

Existem duas rotas para a produção de metanol renovável:

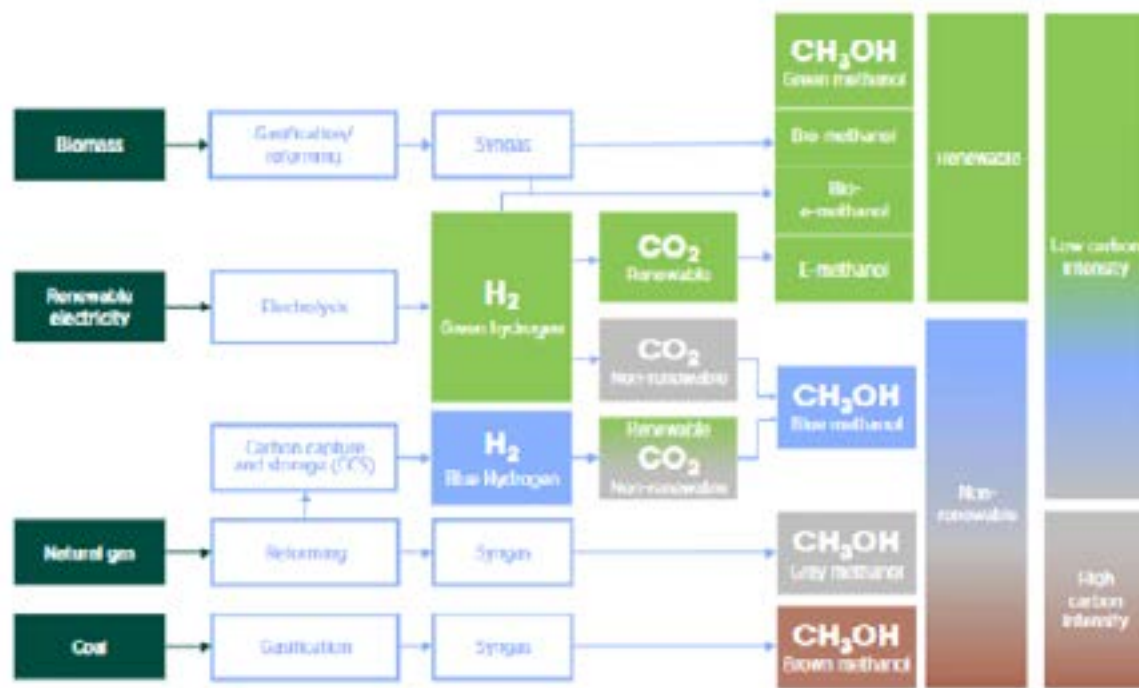
- **Biometanol:** produzido a partir de matérias-primas de biomassa sustentáveis, como resíduos florestais e agrícolas, biogás de aterros sanitários, esgoto, resíduos sólidos urbanos (MSW) e licor negro da indústria de celulose e papel.
- **E-metanol verde:** obtido a partir de CO₂ capturado de fontes renováveis (por exemplo, via BECCS ou DAC) e hidrogênio verde produzido com eletricidade renovável.

Para ser considerado renovável, todas as matérias-primas e energia usadas na produção de metanol devem vir de fontes renováveis. O metanol produzido por essas rotas é quimicamente idêntico ao metanol produzido a partir de fontes de combustível fóssil.

O metanol renovável é uma alternativa sustentável aos hidrocarbonetos e petroquímicos derivados do petróleo. Tem potencial para substituir esses produtos diretamente ou por meio dos derivados do metanol, levando a uma demanda de mercado de bilhões de toneladas de

metanol por ano. O metanol renovável pode ser usado na produção de plásticos, aromáticos e outros produtos químicos, apoiando a transição para uma economia verde circular. Embora o custo de produção mais alto do metanol renovável seja atualmente uma barreira, ele é considerado uma das alternativas sustentáveis mais fáceis de implementar, especialmente nos setores químico e de transporte.

Figura 16 - Principais rotas de produção de Metanol



Renewable CO₂: from bio-origin and through direct air capture (DAC)

Non-renewable CO₂: from fossil origin, industry

While there is not a standard colour code for the different types of methanol production processes, this illustration of various types of methanol according to feedstock and energy sources is an initial proposition that is meant to be a basis for further discussion with stakeholders

Fonte: IRENA (2021).

6.5.2 Progresso atual na produção de metanol renovável

Menos de 0,2 Mt de metanol renovável são produzidos por ano em todo o mundo, a partir de apenas algumas plantas de produção. Essas fábricas se concentram principalmente no uso de resíduos e fluxos de subprodutos de outros processos industriais, como RSU e biomassa de baixo custo, biogás, fluxos de resíduos e licor negro da indústria de papel e celulose. Alguns exemplos de plantas em escala comercial incluem uma planta de biometanol na Holanda que

produz biometanol a partir de biometano, uma planta no Canadá que produz biometanol a partir de RSU e uma planta na Islândia que produz e-metanol combinando hidrogênio renovável e CO₂ de uma usina de energia geotérmica.

Esses projetos se beneficiam de condições favoráveis, como baixo custo de matéria-prima, forte integração com processos industriais convencionais ou eletricidade renovável muito barata. Existem também outras oportunidades iniciais ou de nicho para a produção de biometanol e e-metanol, como a produção integrada com bioetanol de cana-de-açúcar ou coalimentação de matéria-prima de biomassa e combustíveis fósseis.

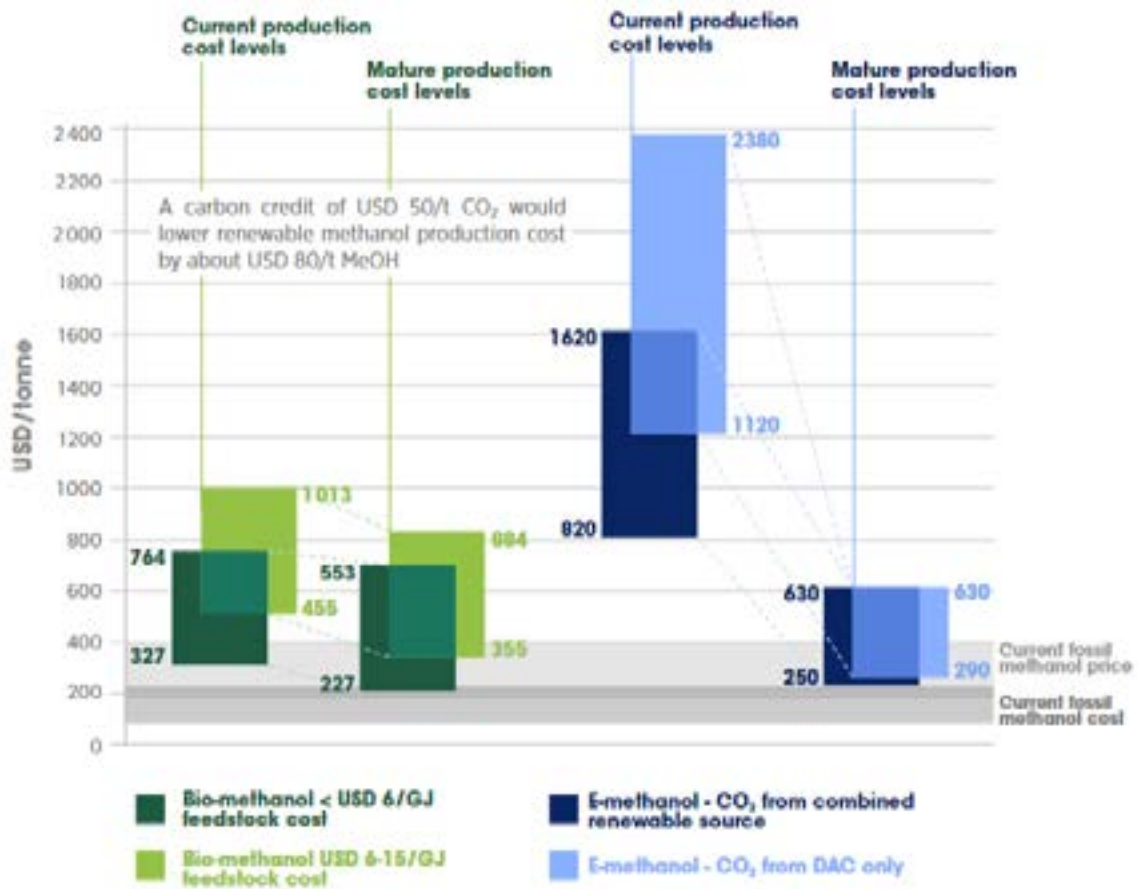
A coalimentação de matéria-prima renovável em instalações de produção de metanol baseadas em gás natural ou carvão pode ser uma estratégia para introduzir gradualmente a produção de metanol renovável e reduzir o impacto ambiental e a intensidade de carbono da produção convencional de metanol.

6.5.3 Competitividade de custo do metanol renovável

Os custos de produção do metanol renovável são atualmente mais altos do que os da produção de metanol a base de gás natural e carvão. No entanto, com melhorias nos processos de produção e com o uso de matérias-primas de baixo custo, o custo de produção de metanol renovável pode se aproximar do metanol de combustíveis fósseis.

A redução de custos virá principalmente da redução dos custos de produção por meio de economias de escala, mecanismos de curva de aprendizado e configurações de fábrica aprimoradas. A disponibilidade de matérias-primas de biomassa sustentáveis e de baixo custo também desempenha um papel crucial na expansão da produção de biometanol.

Figura 17 - Custos de produção atuais e futuros de bio e e-metanol



Fonte: IRENA (2021)

- **Melhorando a competitividade do Biometanol**

A competitividade do biometanol pode ser melhorada através da maturidade tecnológica e redução de custos. Embora a gaseificação de petróleo e carvão seja uma tecnologia comprovada, a aplicação de tecnologias de gaseificação para biomassa e RSU ainda está na fase inicial de comercialização e requer maior desenvolvimento.

A redução dos gastos de capital (CAPEX) será crucial na redução dos custos de produção, alcançada por meio de economias de escala, mecanismos de curva de aprendizado e melhorias de processo. Além disso, a disponibilidade de matérias-primas de biomassa sustentáveis e de baixo custo é essencial para o aumento da produção de biometanol.

- **Melhorando a Competitividade do E-Metanol**

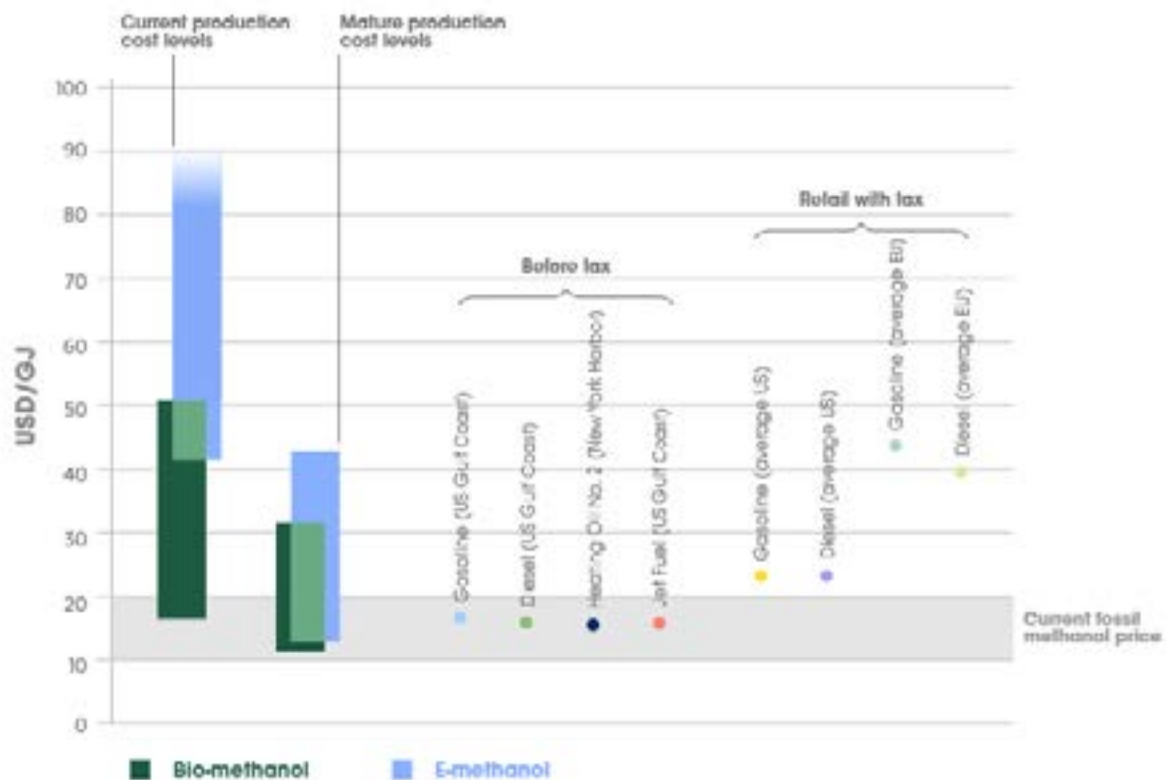
A produção em larga escala de e-metanol depende da disponibilidade abundante e de baixo custo de hidrogênio verde e CO₂, bem como do custo de capital da planta. Os principais

fatores de custo para a produção de e-metanol são o custo da energia renovável necessária para a geração de hidrogênio e as taxas de utilização da planta. Atualmente, a produção de e-metanol continua cara, mas o custo da eletricidade renovável de energia eólica e solar deverá diminuir nas próximas décadas. Economias de escala e inovação em eletrolisadores também contribuirão para a redução de custos.

- **Fonte de carbono sustentável e acessível**

Para ser renovável e sustentável, o CO₂ necessário para a produção de e-metanol pode ser capturado de várias fontes, como usinas de energia e fluxos de exaustão industrial. No entanto, o custo da captura de CO₂ precisa diminuir substancialmente. A combinação da produção de bio e e-metanol em uma única instalação pode ser benéfica, onde o excesso de CO₂ gerado na produção de bio-metanol pode servir como fonte de CO₂ para a produção de e-metanol usando hidrogênio verde.

Figura 18 - Comparação do metanol renovável com outros combustíveis com base no preço por unidade de energia custos de produção atuais e futuros de bio e e-metanol



Fonte: IRENA (2021)

6.5.4 Oportunidade nacional no mercado metanol

O Brasil pode se beneficiar da produção de metanol verde de várias maneiras. O metanol verde é produzido usando hidrogênio verde, obtido de fontes renováveis, como energia eólica, solar e hidrelétrica por meio da eletrólise da água. Esse hidrogênio pode então ser combinado com CO₂ capturado de fontes renováveis para produzir metanol verde.

A energia eólica offshore é uma das rotas para o uso de hidrogênio, amônia e metanol verde no Brasil. A geração de energia offshore possibilitará o desenvolvimento de novos mercados eletrointensivos e atrairá indústrias para o consumo dessa nova alternativa de fonte renovável. A produção de hidrogênio para consumo industrial e para geração de energia, inclusive para exportação, na forma de amônia e metanol verde está emergindo como o futuro da energia eólica *offshore*.

A cana-de-açúcar pode ser usada para produzir bio metanol através do processo de conversão de biomassa. A conversão de biomassa em vetores energéticos e químicos representa uma direção interessante para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e proteger o meio ambiente. O metanol é um desses vetores amplamente utilizado como fonte de energia e matéria-prima para vários produtos de valor agregado.

O metanol sintetizado a partir de combustíveis fósseis, como gás natural e carvão, como matéria-prima não é sustentável e, portanto, muito interesse tem sido desviado para a utilização de biomassa para a síntese de biometanol. Conversão termoquímica, rotas biológicas e outras novas estratégias demonstram uma via eficaz para a produção de biometanol. As matérias-primas à base de biomassa parecem ser um substrato ideal para tais caminhos.

No Brasil, a fonte de açúcar básica é a cana-de-açúcar – cuja levedura pode fermentar diretamente em etanol. O etanol pode então ser convertido em metanol através de um processo chamado desidratação. Este processo envolve a remoção de água do etanol para produzir metanol.

O uso de metanol verde como combustível pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir para os esforços globais de mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o desenvolvimento de uma indústria de metanol verde no Brasil poderia criar empregos e estimular o crescimento econômico.

Uma outra rota de produção de biometanol poderia ocorrer por meio da produção de bioetanol de milho, projeto altamente rentável em termos econômico-financeiros.

Neste modelo de planta, que utiliza por exemplo o milho como insumo, após a fer-

mentação é gerada uma cesta de coprodutos tais como o bioetanol, o óleo de milho, o DDGS ou o WDG (ração animal), a energia elétrica (geralmente gerada por meio de vapor criado em caldeiras) e o gás carbônico.

Esses dois últimos outputs (energia elétrica e gás carbônico) poderiam ser utilizados em uma outra planta industrial, anexa à usina de etanol, mas para a geração de biometanol.

Com efeito, se parte do etanol produzido for aplicado em um reformador, poderemos gerar um modelo simplificado de produção de hidrogênio sustentável, a qual a literatura já intitula de “biohidrogênio”.

E se aplicado esse biohidrogênio com o gás carbônico gerado no processo de produção de bioetanol, teremos então o biometanol, produzido, no entanto, de forma mais economicamente viável que a que ocorreria com o uso de um eletrolisador.

De fato, além de a produção de hidrogênio a partir da reforma do etanol ser mais barata que com o uso de eletrolisador, a elevada taxa interna de retorno de um empreendimento de produção de bioetanol poderia vir a viabilizar um projeto de biometanol.

Dentre outras estratégias, o Capítulo 6 vai detalhar melhor a viabilidade de produção de biohidrogênio e biometanol a partir de uma planta de bioetanol a ser instalada junto ao porto de Itaguaí, utilizando a infraestrutura ferroviária do porto para a chegada dos insumos (biomassa e milho) até a planta.

6.6 Combustíveis sintéticos

Os *e-fuels* têm origem no processo industrial de eletrólise que separa o hidrogênio do oxigênio na água. Posteriormente, o hidrogênio é misturado ao dióxido de carbono para criar, juntamente com fontes vegetais ou animais, combustíveis que não usam petróleo ou gás natural.

A expansão da produção do hidrogênio verde, necessário para a produção dos combustíveis sintéticos, requer redução dos custos de produção das energias solar e eólica, além de avanços nas tecnologias de eletrólise e de transformação do *e-fuels*.

Esses são elementos fundamentais da transição energética no transporte de pessoas e cargas. No transporte aéreo, por exemplo, o uso de combustível de aviação sustentável (SAF) e inovações tecnológicas que ampliem a eficiência das turbinas dos aviões ainda precisam avançar muito para aumentar a competitividade dos combustíveis sintéticos.

Em Punta Arenas, extremo sul do Chile, por exemplo, já está em operação o projeto Haru Oni, experiência pioneira para criação de um complexo verde de combustíveis liderada pela

Highly Innovative Fuels (HIF).

Com amplo suporte do governo alemão e em associação com Exxon, Siemens Energy, Porsche, entre outras empresas, o investimento inicial foi de US\$ 74 milhões. O projeto pretende produzir 130 mil litros de *e-fuels* inicialmente e atingir 550 milhões de litros a partir de 2027. Apenas esse projeto seria capaz de elevar em 13,75 vezes a produção global de hidrogênio verde atual (2021).

Outro projeto, ainda mais ambicioso, se desenvolve no sul do Texas, no condado de Matagorda. Coordenado pela mesma HIF e focado na produção de metanol para a indústria química, esse projeto tem início de produção previsto para 2024 e projeta produzir 750 milhões de toneladas de *e-fuels* até 2027, utilizando 300 milhões de toneladas de hidrogênio verde e 2 milhões de toneladas de CO2 reciclados anualmente (conforme disponível em www.epbr.com.br, acesso em 23.08.23)

Devido aos baixos custos de produção de energias limpas (como a solar e a eólica), o Brasil apresenta um enorme potencial de produção de combustíveis sintéticos no futuro, por grupos como a Petrobras e a Vibra.

Líder no mercado brasileiro de distribuição de combustíveis e de lubrificantes, a Vibra detém a licença de uso da marca Petrobras, formando uma rede com 8,3 mil postos de combustíveis, em todo o país. As franquias da Vibra Energia para o segmento são as lojas de conveniência BR Mania e os centros de lubrificação automotiva Lubrax+. Com uma estrutura logística que garante sua presença em todas as regiões do país, a empresa conta com um portfólio de mais de 18 mil grandes clientes corporativos, em segmentos como aviação, transporte, indústrias, mineração, produtos químicos e agronegócio.

Com a marca BR Aviation, por exemplo, a Vibra possui cerca de 57% do mercado de aviação, abastecendo aeronaves em mais de 90 aeroportos brasileiros. Em lubrificantes, é líder de mercado com a marca Lubrax e possui a maior planta industrial para produção de lubrificantes da América Latina (conforme informado em www.vibraenergia.com.br, acesso em 23.08.23).

Por estar investindo enormemente em distribuição de combustíveis ao longo da costa brasileira por meio da cabotagem, a Vibra se coloca como um potencial parceiro estratégico do Porto de Itaguaí em um futuro projeto de produção e distribuição de combustíveis sintéticos no país.

6.7 Vantagens da estruturação de clusters de hidrogênio verde

Investir em hidrogênio verde oferece vários benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade. Em primeiro lugar, a produção de hidrogênio verde pode substituir os combustíveis fósseis, levando a uma diminuição no consumo de combustíveis fósseis e a uma melhoria na qualidade do ar, do solo e da água.

Essa transição para o hidrogênio verde pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e ajudar a combater o aquecimento global.

Em segundo lugar, o desenvolvimento de clusters industriais de hidrogênio verde pode criar novas oportunidades de crescimento econômico e criação de empregos. Esses clusters podem servir como hubs para produção, armazenamento, distribuição e consumo de hidrogênio verde, atraindo investimentos e fomentando a inovação no setor de energia renovável.

Além disso, o estabelecimento de redes de hidrogênio verde e colaborações entre clusters poderia vir a promover o compartilhamento de conhecimento, as melhores práticas e a replicação de projetos bem-sucedidos. Isso poderia acelerar a implantação de tecnologias de hidrogênio verde e facilitar a ampliação da produção para atender à crescente demanda por energia limpa.

7. ESTRATÉGIAS PARA A VIABILIZAÇÃO DE PROJETOS EM UM FUTURO CLUSTER DE HIDROGÊNIO VERDE JUNTO AO PORTO DE ITAGUAÍ

Por estar fisicamente localizado entre as duas mais importantes metrópoles do Brasil (São Paulo e Rio de Janeiro), em uma região altamente industrializada e contando com boa infraestrutura de acessos (rodo, ferro e hidroviários), o Complexo Portuário de Itaguaí encontra-se vocacionado para projetos de infraestrutura de grande porte, no qual um cluster de hidrogênio verde pode ser exemplo.

Deixando a parte o tema da indústria petroquímica (especificamente quanto a futura produção de combustíveis sintéticos), já abordado na temática do Pólo Gaslub (antigo COMPERJ) e também a possibilidade de produção de amônia verde, a ser utilizado pela indústria de fertilizantes ou a ser exportado para o mercado internacional, (como carregador de hidrogênio, para produção de energia a partir de operações de cracking), os terminais mais fortemente conectados com a temática da produção e/ou consumo do hidrogênio verde são o Terminal Ternium Brasil e as operações da mineradora VALE, que em Itaguaí opera o Terminal da Ilha Guaíba

(TIG).

A Ternium é uma siderúrgica líder na América Latina. As instalações da Ternium estão localizadas no México, Brasil, Argentina, Colômbia, sul dos Estados Unidos e América Central. Além disso, a empresa participa no grupo de controle da Usiminas, empresa líder em aços planos no mercado brasileiro.

Segundo seu Relatório de Sustentabilidade 2021, A Ternium tem um papel ativo nos esforços mundiais para enfrentar as mudanças climáticas. Como empresa siderúrgica, ela está buscando maneiras de reduzir a pegada de carbono de suas operações e da cadeia de valor do aço. Para isso a empresa fechou parceria com fornecedores e outras empresas e associações para promover o desenvolvimento de sistemas de baixa emissão de dióxido de carbono. A fim de descarbonizar suas operações no longo prazo, a Ternium pretende desenvolver tecnologias siderúrgicas, disponibilizar matérias-primas, energia renovável e infraestrutura, e ainda editar regulamentações governamentais para promover o comércio justo.

Em agosto de 2021, a empresa assinou memorando de entendimento (MoU) com a Vale, seu principal fornecedor de minério de ferro para estudar em conjunto o uso de briquetes de minério de ferro em seus altos-fornos e a viabilidade econômica de investir em uma planta de briquetagem de minério de ferro com a tecnologia da Vale.

A empresa também desenvolve parcerias para o uso de biomassa, substituto do carvão metalúrgico para suas unidades siderúrgicas no Brasil e na Argentina. Para aprimorar essas práticas de compras e aquisições sustentáveis, a Ternium firmou uma parceria com a Exiros, uma empresa especializada em compras, que pertence 50% à Ternium e 50% à Tenaris.

No evento *Green Hydrogen Application Summit*, realizado pela Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro (AHK Rio) em outubro de 2022 o vice-presidente de Operações da Ternium Brasil, Titus Schaar informou haver interesse da empresa em conversar com potenciais parceiros para avançar ainda mais na produção industrial com baixo carbono, por exemplo, usando CO₂ a ser disponibilizado pela empresa juntamente com o H₂V de algum parceiro e produzir metanol azul em pequena escala. Já em grande escala, a empresa precisaria contar com o fornecimento de hidrogênio verde a preço competitivo.

Informou ainda que nem o gás natural e nem H₂V apresentam preço competitivo no Brasil. “Se alguém oferecer hidrogênio verde de US\$ 2 a 3 o quilo, nós investiremos”, disse Schaar, com bastante clareza sobre como viabilizar o plano de negócios da Ternium no Brasil com vistas a um contexto de baixo carbono.

Tendo em vista a ausência de subsídios para o desenvolvimento do mercado do hidrogê-

nio verde, nos moldes hoje praticados nos EUA e Europa, a viabilização de projetos de hidrogênio no Brasil só tende a ocorrer por meio do barateamento dos custos de produção ou pela identificação de compradores (*offtakers*) no mercado internacional, principalmente em países como a Alemanha, Bélgica e Holanda.

Neste sentido, de forma prática, apresentamos abaixo 5 opções de estudos de viabilidade para empreendimentos passíveis de serem desenvolvidos no porto de Itaguaí, quais sejam:

a) estruturação de uma planta de grande porte (acima de 50 MW) para **produção de amônia verde** a ser exportada para produção de energia na Europa (por exemplo, nos leilões realizados pela **HINT.CO** na Alemanha). De se destacar que, neste caso, o *offtaker* teria que ser internacional, tendo em vista o menor custo da amônia importada pelo Brasil para a fabricação de fertilizantes. A energia renovável desse empreendimento poderia ser fornecida a partir de um ou alguns dos projetos de produção solar ou eólica hoje em planejamento na região;

b) instalação de uma usina de etanol de milho de grande porte junto ao porto, a ser integrada a uma planta para **reforma do etanol e produção do hidrogênio verde** (com tecnologia da **NEA/Hytron**, por exemplo), servindo a alta taxa de retorno de uma usina de etanol utilizada para compensar e reduzir os custos de produção do hidrogênio verde ao mínimo (mesmo que de forma cruzada), se possível até um valor de USD 3 o quilo, possibilitando assim uma parceria e captação de investimento da **Ternium** para produção de **metanol azul**, a partir do fornecimento de gás carbônico por esta empresa, tal como proposto por seu Vice Presidente de Operações;

c) em um outro formato, a **reforma do etanol para produção de hidrogênio** seria acoplada ao **gás carbônico produzido pela própria planta de etanol** (em função da fermentação realizada), gerando-se assim **metanol verde**, a ser vendido a potenciais compradores no Brasil. Em ambos os casos os insumos necessários (milho para fermentação e biomassa para a geração de energia na caldeira) chegariam ao porto no modal ferroviário, a partir da originação de ambos os insumos no Estado de Minas Gerais, sendo acondicionados em silos de grande porte, a serem instalados no porto;

d) parceria com a GIZ ou outro órgão internacional de apoio para a instalação de uma **unidade eletrolisadora junto ao porto**, que poderia fornecer **hidrogênio verde** em pequena ou média escala (5 a 10 MW, por exemplo) para aplicações industriais, de mobilidade etc. no Brasil. Por ser um projeto modular, a **VALE**, por exemplo, poderia entrar como parceira neste projeto, em caso de interesse nesse hidrogênio para os projetos de descarbonização hoje em estudo e que em breve pretende implantar, podendo-se combinar o aumento da oferta do H₂ da nova planta com a expansão dos projetos de aplicação do hidrogênio verde nas atividades

daquela empresa. Diversos portos no mundo estão hoje instalando pequenas unidades eletrolisadoras para aplicações em atividades logísticas do próprio porto (em cranes, empilhadeiras e portêineres, por exemplo, que já começam a operar com ***fuel cells de hidrogênio***).

e) estruturação de uma planta de hidrogênio verde (a ser acoplada a um fornecedor de gás carbônico, como a Ternium) para a produção de combustíveis sintéticos (SAF ou e-gasolina, por exemplo) para atendimento do mercado brasileiro de aviação, transporte urbano ou ainda para exportação para a Europa, para o atendimento a demanda de diversos países, como a Alemanha, que tem procurado estimular estes combustíveis.

Um aprofundamento quantitativo, com números de entrada e saída, poderia vir a ser realizado a partir da definição de qual das rotas seguir.

Outros modelos de negócio poderão vir a surgir a partir de um aumento na demanda de **metanol para embarcações (em um futuro *bunker* junto ao porto, por exemplo)**, ou ainda quando os projetos de hidrogênio da Petrobras forem oficialmente divulgados, podendo-se então tentar conectá-los ao porto.

8. CONCLUSÃO

O Porto de Itaguaí, localizado no litoral norte da Baía de Sepetiba, no Rio de Janeiro, está emergindo como um ator fundamental na transição energética global. Esse amplo complexo marítimo, que engloba o porto organizado administrado pela Companhia Docas do Rio de Janeiro (CDRJ) e vários Terminais de Uso Privado (TUPs) autorizados pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), estabeleceu-se firmemente como um dos pilares da atividade industrial, com foco especial no manuseio de granéis de minerais sólidos, na produção de aço e na logística portuária.

Ao olharmos para o futuro, a localização estratégica do Porto de Itaguaí, entre os principais centros urbanos do Brasil, Rio de Janeiro e São Paulo, assume um significado ainda maior. Esse movimentado centro se encontra em uma posição única na confluência de várias indústrias, com vínculos notáveis com o setor de hidrogênio. Essas conexões incluem as operações de mineração da Vale e os esforços pioneiros da Ternium na descarbonização em suas plantas industriais mexicanas e norteamericanas.

Nossa análise também abarcou o potencial imediato de utilização do hidrogênio nos setores de refino e fertilizantes como estratégias de descarbonização. Com efeito, os setores de aço, metalurgia, cerâmica, vidro e cimento estão preparados para se juntar aos novos consumidores de

hidrogênio verde nos próximos cinco anos.

No setor de *oil&gas*, o desenvolvimento do Itaboraí GasLub Hub promete ser um divisor de águas no cenário energético do Brasil. Esse complexo, inicialmente concebido como Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ) pela Petrobras, está estrategicamente posicionado para receber gás natural da Bacia de Santos, reforçando o fornecimento de gás doméstico e reduzindo a dependência das importações de GNL. Além disso, o foco renovado da Petrobras na transição energética, na produção de biocombustíveis e na possível redução das alíquotas de ICMS para as indústrias intensivas em gás na região do GasLub oferece caminhos promissores para a sinergia para um futuro empreendimento de hidrogênio na hinterlândia do porto.

A produção de amônia, especialmente para a produção de fertilizantes nitrogenados, também se alinha estrategicamente com as ambições do Porto de Itaguaí na área de hidrogênio. O potencial para instalações de abastecimento de amônia e metanol abre novas portas para o transporte marítimo, com a amônia verde emergindo como um combustível transformador. Enquanto isso, a produção de metanol verde é uma promessa significativa tanto para as empresas de navegação quanto para os setores domésticos, reduzindo a dependência de importação e avançando nas metas de sustentabilidade.

À luz dessas oportunidades, nosso estudo traça uma estratégia para geração de viabilidade econômica imediata para um projeto voltado a produção de hidrogênio. Neste sentido, uma usina de etanol de larga escala, estrategicamente localizada na retroárea do porto, otimizaria a logística ferroviária e hidroviária, abrindo caminho para a produção de hidrogênio verde e metanol por meio da reforma do etanol. Esse empreendimento autossustentável, impulsionado pela captura do carbono gerado pela fermentação do milho, ressaltaria o potencial de iniciativas do setor privado para financiar a produção de hidrogênio e metanol verdes sem a necessidade de subsídios governamentais.

Em conclusão, o Porto de Itaguaí surge como um catalisador dinâmico na transição energética global, oferecendo vantagens estratégicas para a produção de hidrogênio verde, amônia e metanol. Suas conexões logísticas com diversas empresas de grande porte no eixo Rio-São Paulo-Belo Horizonte e infraestrutura já implantada posicionam este porto como estratégico para futuros projetos de hidrogênio no Brasil.

À medida em que nos aventuramos nessa era transformadora de transição energética, a jornada do Porto de Itaguaí rumo à sustentabilidade social, financeira e ambiental é promissora e exemplifica o poder da inovação e da colaboração para a formação de um futuro mais verde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GUPTA, D. H2 Green Steel Story - the Quest for Earth's Sustainable Future. Midrex Technologies, 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Innovation Outlook: Renewable Methanol, 2021.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. Green Hydrogen Industrial Clusters Guidelines, 2023.

MCKINSEY & COMPANY. Decarbonization challenge for steel, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Perspectivas e potencial da indústria brasileira para o hidrogênio sustentável, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. Plano Mestre do Complexo Portuário de Itaguaí, 2017.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Plano Mestre do Complexo Portuário de Itaguaí, 2019.

MCKINSEY & COMPANY. Green Hydrogen: an opportunity to create sustainable wealth in Brazil and the world. 2021.

YARA INTERNATIONAL; AZANE FUEL SOLUTIONS. Acordo sobre combustíveis para navios à base de amônia verde.

MAERSK; KEPPEL OFFSHORE & MARINE; SUMITOMO CORPORATION. Estudo de viabilidade sobre amônia verde perto do Porto de Singapura.

PETROBRAS. Planos para o Hub GasLub Itaboraí e projeto da Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN)

IBERDROLA. Usina hidrogênio verde Puertollano, 2022.

H2 GREEN STEEL. On course for large-scale production from 2025, 2024.

METSO OUTOTEC. Rectangular six in line smelting furnace for converting direct reduced iron (DRI) to molten metal: DRI Smelting Furnace, 2022.

BRAZIL ENERGY INSIGHT. Hydrogen, ammonia and green methanol are routes for offshore wind energy use in Brazil. 2023.

PARKHEY, P. Biomethanol: possibilities towards a bio-based economy. Biomass Conversion and Biorefinery, v. 12, p. 1877-1887, 2022.

BBC. Biofuels - Ethanol and spectroscopy [GCSE Chemistry only], 2020.