



ANAIS
I SEMINÁRIO NACIONAL
DE HIDROGÊNIO VERDE-SENAHIDRO



ESCOLA DA
ENERGIA

HIDROGÊNIO VERDE NO RIO GRANDE DO NORTE. EXPECTATIVA DO MARCO LEGAL E DESAFIO DA REGULAÇÃO

Fátima Maria Oliveira Viana¹

José Gomes Ferreira²

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é analisar o estágio atual de elaboração do marco legal estadual para a produção de hidrogênio verde no Rio Grande do Norte, à luz dos estudos sobre a experiência local e regional com a energia eólica *onshore*, em busca de contribuir com o processo de regulação estadual. As análises foram realizadas a partir de consulta bibliográfica à literatura internacional e nacional, às resoluções de agências internacionais, às legislações existentes, além de notícias da mídia, entre outras. A geração pós-protocolo de Quioto destacou-se pelo investimento em eletricidade a partir de energias renováveis. Mais recentemente, a aceleração dos impactos das mudanças climáticas e a conjuntura internacional têm favorecido a ampliação dos investimentos na produção de hidrogênio verde, considerado como um vetor fundamental para transição energética. O Brasil tem procurado se inserir nessa agenda, com foco na produção de hidrogênio verde na perspectiva da exportação. O Nordeste brasileiro se destaca por concentrar a maior produção de energias renováveis do país, enquanto o Rio Grande do Norte (RN), estado brasileiro com maior capacidade instalada, se esforça para evidenciar sua potencialidade com as energias eólica *onshore* e *offshore* e fotovoltaica, propondo a construção do empreendimento Porto-Indústria Verde. A regulação da produção de hidrogênio verde é determinante para garantir segurança jurídica e os mecanismos de proteção ao meio ambiente e às comunidades afetadas. No caso do Rio Grande do Norte, a legislação em construção apresenta lacunas, principalmente, no campo da proteção aos direitos e aos interesses das comunidades tradicionais.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Transição energética, Rio Grande do Norte.

¹ Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Estudos Urbanos e Regionais do Instituto de Políticas Públicas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPEUR/IPP/UFRN).

² Professor, Doutor no Programa de Pós-graduação em Estudos Urbanos e Regionais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPEUR/IPP/UFRN).

INTRODUÇÃO

O debate sobre a necessidade de diversificar a matriz energética mundial a partir das fontes renováveis e, assim, reduzir a dependência dos combustíveis fósseis ganha destaque a partir da primeira crise petrolífera da década de 1970 e acentua-se a partir da tomada de consciência para a questão da mudança climática, o que ocorre em escala internacional na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, com a aprovação da Convenção-Quadro para as Mudanças Climáticas. Desde então tem-se vários desdobramentos por via da realização das conferências das partes, levando à formulação de acordos e tratados, com destaque para a assinatura do Protocolo de Kyoto (1997) e para o Acordo de Paris (2015). Através do primeiro os países signatários estabeleceram, pela primeira vez, metas para a redução da emissão dos gases com efeito de estufa e através do segundo se comprometeram em reduzir as emissões para evitar a elevação do aquecimento da terra acima de 2,0 °C em relação aos níveis pré-industriais.

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*IPCC* na sigla em inglês) divulgado em 2023 demonstrou que a temperatura média mundial se elevou em 1,1°C quando comparada ao período pré-industrial, e que a velocidade com que essa alteração ocorre foi mais acelerada a partir da década de 1990. Considera ainda que para limitar o aquecimento global em 1,5 °C é necessário reduzir as emissões rapidamente e alcançar zero emissões até 2050 (Lee *et al*, 2023).

Os desafios de alcançar zero emissões até 2050 sem interromper o processo desenvolvimento dos países têm levado à inclinação pelo hidrogênio verde como vetor energético determinante. Em torno da perspectiva da economia do hidrogênio já somam mais de 30 os países que adotaram estratégias para a produção de hidrogênio verde, com destaque para os pioneiros como China, a União Europeia, a Índia, o Japão, a República da Coreia e os Estados Unidos.

A transição para um novo padrão energético altera a base tecnológica da economia, com repercussão nas estruturas econômicas, políticas e sociais. Considerando a maior disponibilidade de acesso à matéria prima e facilidade de produção do hidrogênio, essas alterações podem se traduzir em novos conflitos e perturbações entre países.

Nesse sentido, a regulação da economia do hidrogênio assume importância destacada em âmbito internacional, nacional e local, para que a competição normativa dê lugar à cooperação internacional e possa garantir esforços prioritários na descarbonização dos setores

mais difíceis de eletrificação como aqueles relacionados à indústria química, à siderúrgica, aos transportes de carga pesada, à navegação e à aviação de longo curso (IRENA, 2022).

O objetivo do trabalho é analisar o estágio atual de elaboração do marco legal estadual para a produção de hidrogênio verde no Rio Grande do Norte, à luz dos estudos sobre a experiência local e regional com a geração de energia eólica *onshore*, em busca de contribuir com o processo de regulação, ao destacar a experiência acumulada no Estado e na Região, somada aos projetos de lei em desenvolvimento e à experiência das comunidades locais envolvidas.

No prosseguimento do texto se destaca o cenário das energias renováveis, da emergência climática, do hidrogênio, a importância e o desafio da regulação no Rio Grande do Norte, seguido das Considerações finais.

Para dar conta do objetivo se recorre a uma revisão bibliográfica da literatura nacional e internacional, à consulta aos relatórios das Agências e Organizações internacionais, bem como consulta a documentos oficiais relacionados à política institucional para o setor energético no Brasil, à legislação pertinente consolidada e em desenvolvimento. A pesquisa realiza-se no contexto do mestrado do Programa de Pós-graduação em Estudos Urbanos e Regionais, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

1. EVOLUÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

A busca por fontes de energia renovável para diversificar a matriz energética mundial e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis integra os debates internacionais sobre a temática ambiental desde a conferência da ONU sobre o meio ambiente humano, realizada em 1972, quando se evidenciou a crise ambiental decorrente da poluição e degradação do meio ambiente, acentuando-se com a primeira crise petrolífera registrada no ano seguinte. Na mesma década, com as crises petrolíferas de 1973 e 1979 registra-se o primeiro choque do petróleo, em decorrência da redução de sua oferta no mercado internacional expôs a vulnerabilidade dos países dependentes da importação dessa fonte de energia, o que ensejou a iniciativa de vários países no desenvolvimento de novas alternativas no campo energético: impulsionamento da energia nuclear na França, dos biocombustíveis no Brasil a partir do “Pró-álcool”, da reciclagem e eficiência energética no Japão e na Suécia, e da energia eólica na Dinamarca (Giddens, 2010).

O tema das energias renováveis teve relevo novamente na Conferência da ONU de 1992, a Rio 92, de cujas resoluções se destaca a aprovação da Convenção-Quadro sobre as Mudanças Climáticas (UNFCCC), responsável por estruturar e destacar as prioridades de ações frente aos

problemas ambientais como eventos climáticos extremos. A referida convenção destaca a necessidade de estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera para evitar alterações climáticas irreversíveis, capazes de ameaçar a produção de alimentos, o desenvolvimento e a continuidade da vida humana (ONU, 1992).

O órgão supremo da Convenção-Quadro das Nações Unidas é a Conferência das Partes (COP), que se reúne anualmente para reafirmar os compromissos assumidos, acompanhar, supervisionar e avaliar a implementação desta convenção, além de estruturar as medidas futuras. Os desdobramentos da UNFCCC a partir das COPs estão expressos em resoluções, acordos e tratados, dos quais se destacam o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris.

A Conferência das Partes de 2015, a COP-21, que aprovou o Acordo de Paris continua sendo a principal referência atual pela dimensão e importância dos acordos assumidos, na qual 195 países selaram o compromisso para manter o aquecimento global em menos de 2°C e desenvolver esforços para limitar este aquecimento em 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, por meio de ações de mitigações e de reduções progressiva de emissões, com vista à emissões zero em 2050 (ONU, 2015).

Alinhada aos esforços para limitar o aquecimento global e alcançar a neutralidade das emissões de GEE até 2050, a Agenda 2030 das Nações Unidas reafirma seu compromisso com o desenvolvimento sustentável, como caminho para erradicar a pobreza, a fome e as desigualdades no planeta e destaca entre seus dezessete objetivos o de garantir equidade e acesso justo a energias não poluentes (ONU, 2015).

A partir das informações das agências internacionais de energia e de energia renovável (IEA e IRENA), observa-se o crescimento da capacidade global de geração de novas energias renováveis, com destaque da eletricidade eólica e fotovoltaica, que após o protocolo de Kyoto foram objeto de investimentos e atualmente registram elevado desenvolvimento. A capacidade global de geração de energias renováveis em 2022 apresentou variação positiva em relação a 2021, passando de 3.077.238 para 3.371.793 MW. Tal variação foi registrada em vários países e regiões, mas a maior concentração da geração renovável se concentra na Ásia que responde por 1.630.282 MW, sendo a China o país com maior capacidade de geração regional em 2022, com 1.160.799 MW. A Europa alcançou a capacidade de 708.582 MW e os Estados Unidos de 351.676 MW (IRENA, 2023).

O Brasil se destaca nesse cenário energético por dispor de uma matriz diversificada, na qual 48,7% têm origem nas fontes renováveis. A matriz elétrica nacional é composta predominantemente por energia hidroelétrica (EPE, 2023), seguida pela geração eólica, que já

conta com capacidade instalada de 25,63 GW. No ano de 2022, a geração de energia por esta fonte representou 13,4% de toda a energia elétrica nacional ofertada. (ABEEólica, 2023).

A geração de energia elétrica por fonte eólica integra a geração nacional de forma complementar e sua implementação se iniciou a partir de incentivos do governo federal por meio de programas como o Programa Emergencial de Energia Eólica - PROEÓLICA, sucedido pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativa de Energia Elétrica - PROINFA. A partir de 2009, com a realização dos leilões de energia, a geração eólica se consolida e continua em expansão.

O Rio Grande do Norte é um dos estados brasileiros de maior potencial eólico, pois além de dispor da maior capacidade de geração instalada no país é, atualmente, o maior produtor nacional de energia eólica, com 3.116 aerogeradores instalados, distribuídos em 261 parques e com potência instalada de 8.483,03 MW (ABEEólica, 2024).

No entanto, em que pese o protagonismo do maior gerador de energia eólica no país, a expectativa da população e de lideranças dos movimentos sociais quanto à possibilidade de desenvolvimento local, a partir da geração de energia por fonte eólica, não tem se confirmado no que diz respeito a alteração na dinâmica local, com geração de emprego e de renda, capaz de elevar a qualidade de vida das pessoas e proporcionar o surgimento de novas atividades, conforme sugerem estudos realizados sobre a experiência potiguar.

Segundo Luziene Macêdo, em estudo de 2015, a ausência do encadeamento produtivo a nível regional do setor eólico no Rio Grande do Norte, pode implicar na impossibilidade desta atividade se ligar a outros setores econômicos. Neste caso os benefícios locais se limitam a contratação de mão de obra no período de instalação dos parques e arrendamento de terras, sem repercussão positiva permanente na dinâmica socioeconômica dos municípios (Macêdo, 2015).

Rafael Costa (2015) identifica haver frustração nos municípios produtores de energia elétrica por fonte eólica no Estado quanto à perspectiva de desenvolvimento. Para o pesquisador, o desenvolvimento desta atividade em “economias frágeis e pouco desenvolvidas” como as dos municípios potiguares resulta em pouca ou nenhuma interação com outras atividades existentes na localidade. A explicação estaria na forma como se instalam os parques e como se realiza a geração de energia elétrica por fonte eólica nestes municípios, que funcionam como “enclave econômico” (Costa, p. 116, 2015).

2. EMERGÊNCIA CLIMÁTICA E HIDROGÊNIO VERDE

A ampliação da geração de energias renováveis em todo o globo contrasta com o crescimento das emissões de gases de efeito estufa e a elevação da temperatura da terra, principalmente, nos últimos 30 anos. As alterações climáticas atuais configuram um quadro de emergência climática, na qual são cada vez mais frequentes os eventos climáticos extremos.

Nesse cenário, a demanda por solução ultrapassa a necessidades das mitigações e exige a adoção de novas ações para alcançar a neutralidade em carbono, como a transição rápida para um novo paradigma energético, livre de emissões e com base na geração de energias renováveis.

Somam-se a estas razões outros fatores impulsionadores da transição para novo padrão energético, como a dependência da importação de petróleo para a segurança energética dos países não produtores, o desafio da recuperação econômica pós pandemia da COVID-19, além das guerras frequentes que impactam o abastecimento e a segurança energética das nações. O exemplo mais recente é a guerra na Ucrânia, que impactou o fornecimento de gás na União Europeia vindo da Rússia e motivou certa aceleração nas decisões rumo à transição energética na União Europeia (Comissão Europeia, 2022).

Os desafios de construir uma economia de emissões zero e garantir autonomia energética nos espaços locais têm direcionado os países a optar pela produção de hidrogênio verde, caminho já assimilado por grandes economias da União Europeia, da América do Norte e da Ásia. A inclinação pela nova energia é baseada na versatilidade do hidrogênio para armazenar, portar e transportar energia, além de sua geração ser isenta de emissões.

O conhecimento sobre o gás hidrogênio e sua propriedade inflamável vem desde o século XVII, quando Robert Boyle obteve um gás inflamável a partir da dissolução de ferro em ácidos diluídos. Mas somente no século XX se faz referência a sua utilização como vetor energético, sendo considerado atualmente como o vetor principal na perspectiva da descarbonização e da transição energética em curto prazo (Castro, 2023).

A produção de hidrogênio pode ser obtida por variados métodos associados às tecnologias eletrolítica, fotolítica e térmica, utilizando como matéria prima recursos fósseis, água e biomassa. Os processos eletrolítico e térmico dispõem de tecnologias mais desenvolvidas e são os mais utilizados. O processo eletrolítico utiliza como matéria prima recurso renovável (água) e os processos térmicos podem utilizar matéria prima oriunda de recursos fósseis (gás natural e carvão) ou de recursos renováveis (biomassa e biogás) (Castro, 2023).

A eletrólise da água para produção de hidrogênio é um processo considerado simples, já utilizado pela sociedade desde o século XIX e totalmente verde, livre de emissões se utilizar

eletricidade de fonte renovável (hidrelétrica, geotérmica, eólica e solar). No entanto, a produção de hidrogênio eletrolítico é ainda marginal (menos de 5%) em relação à produção global, por conta dos custos de produção. O processo é intensivo no uso de eletricidade e a tecnologia atual dos eletrolisadores utiliza catalizadores a base de metais nobres. Por essa razão, o hidrogênio produzido a partir de recursos fósseis, com captura e sequestro de carbono (hidrogênio azul) tem menor custo de produção e compete com o hidrogênio verde como alternativa aos combustíveis fósseis (Castro, 2023).

Alcançar a predominância do hidrogênio eletrolítico no mercado demanda respostas técnicas e políticas, capazes de garantir a competitividade dos custos de sua produção e a estruturação da cadeia produtiva específica. Tais respostas exigem a elevação dos investimentos em tecnologia e o crescimento da oferta de energias renováveis para a constituição efetiva da economia do hidrogênio.

3. PANORAMA DO HIDROGÊNIO

A perspectiva da economia do hidrogênio tem levado vários países a se prepararem para dominar e liderar as tecnologias relacionadas ao hidrogênio. O relatório da Agência Internacional de Energias Renováveis de 2022 destaca que em 2017 apenas o Japão dispunha de roteiro de hidrogênio aprovado e em 2022 mais de trinta países tem roteiros próprios aprovados ou em construção. São pioneiros desse esforço a China, a União Europeia, a Índia, o Japão, a República da Coreia e os Estados Unidos. A África, com destacado potencial em recursos renováveis, tem sido destino de investimento em vários projetos de hidrogênio, com destaque para o Egito, Zimbábwe, Mauritânia e Namíbia (IRENA, 2022).

Os atuais exportadores de combustíveis fósseis como Austrália, Canadá, Noruega, Oman, Rússia, Arábia Saudita e Emirados Árabes também se programam para exportar hidrogênio. Com estratégias diversas os atuais exportadores desenvolvem roteiros que envolvem a produção de hidrogênio verde, amoníaco verde e de hidrogênio azul, caso da Noruega que dispõe de estrutura para armazenar o carbono capturado, da Arábia Saudita e dos Emirados Árabes, que planejam produzir e exportar os dois tipos de gás (IRENA, 2022).

A depender do desenvolvimento das tecnologias e da redução do custo das energias renováveis, com impacto na produção de hidrogênio verde, países que hoje são importadores de combustíveis fósseis e que dispõem de recursos renováveis podem se transformar em exportadores de hidrogênio verde e de seus derivados, como insumos e combustíveis verdes. Esse pode ser o caso de países da América Latina como o Chile, que aprovou estratégia nacional

em 2020, com o objetivo de alcançar a produção de 25 GW de hidrogênio até 2030 e de ser um dos principais exportadores em 2040 (IRENA, 2022).

4. DESAFIO DA REGULAÇÃO

A transição global para um novo paradigma energético em busca da neutralidade em carbono precisará contar com variadas fontes de energia renovável, capaz de atender a multiplicidade de demandas da sociedade, além da necessidade de alcançar maior eficiência no uso de energias e de eliminar o consumo desnecessário dessas. Nessa perspectiva, o hidrogênio verde desponta como fator determinante para alcançar os objetivos de zero emissões em 2050, sem que se impeça o desenvolvimento econômico e social dos países, principalmente daqueles em desenvolvimento e dos que ainda não alcançaram caminho para atender as demandas econômicas e sociais internas.

Embora a matéria prima se encontre em todo o globo, para construir a cadeia de valorização e constituir uma economia do hidrogênio, não é suficiente ser abundante em recursos renováveis, pois fatores como infraestrutura existente, configuração da matriz energética, acesso à tecnologia, acesso aos investimentos e participação do poder público são determinantes para sua configuração (IRENA, 2022).

Dadas as variadas formas de produção de hidrogênio e o fácil acesso à matéria prima, a consolidação da economia do hidrogênio poderá ser fonte de segurança energética e sinônimo de equidade no acesso à energia ou não. A forma de regulação e governança das energias nos espaços mundial e local será determinante para responder ao desafio da economia do hidrogênio.

A produção, transporte e conversão do hidrogênio verde demanda uso intensivo de eletricidade renovável e de tecnologias ainda em desenvolvimento e seu uso generalizado pode desequilibrar a relação entre oferta e demanda por eletricidade, o que justifica atenção especial à sua gestão. A agência Internacional de energia renováveis estima demanda de eletricidade em 2050 da ordem de 21.000 TWh, quantidade próxima ao total global da energia gerada atualmente (IRENA, 2022).

A regulação da economia do hidrogênio comporta dimensão mundial e local, poderá ser terreno da competição ou da cooperação internacional. No cenário atual em que as nações se preparam para ocupar espaço na produção e fornecimento de hidrogênio, é importante a normatização mundial sobre a certificação por via dos certificados de origem, referente às emissões em todo o ciclo (produção e transporte) e sobre os aspectos relacionados à

comercialização. Do ponto de vista da descarbonização, a regulação é necessária para garantir prioridade de aplicação nos setores de difícil descarbonização como a indústria química, siderúrgica, caminhões de carga pesada, navegação e aviação de longo curso (IRENA, 2022).

5. HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL E RIO GRANDE DO NORTE

O Brasil apresenta condições diferenciadas para disputar liderança na América do Sul como produtor de hidrogênio verde. O país ostenta matriz energética geral e matriz elétrica consideradas limpas, possui elevada disponibilidade de recursos renováveis e se destaca no cenário mundial como o sexto país em capacidade instalada para geração de energia eólica e solar. A posição do país como gerador de energia eólica lhe credencia como destino para sediar investimentos em ampliação da geração de energia eólica com vistas à produção de hidrogênio verde.

A produção de hidrogênio verde requer ampliação da escala de oferta de energia elétrica e a geração de energia eólica *offshore*³ representa essa oportunidade, dada a maior velocidade e constância dos ventos no ambiente marinho, possibilitando inclusive o reaproveitamento de instalações desativadas e inativas de propriedade da União, como as plataformas da Petrobras em águas rasas, desativadas no processo de desinvestimento recente.

Embora seja destino de investimentos com vistas à produção de hidrogênio verde, o país não dispõe de infraestrutura adequada nem de regulação nacional. Carece ainda de estratégia nacional voltada à constituição da cadeia de valor específica, que possibilite aproveitar a oportunidade da transição para elevar o nível de industrialização nacional, preservar e gerar novos postos de trabalho, capaz de acolher 11,8 milhões de trabalhadores entre desempregados e desalentados (IBGE, 2023).

Os Estados do Nordeste com maior protagonismo na produção de energia eólica como a Bahia, o Ceará e o Rio Grande do Norte são também os que, na Região, sediam o debate e o desenvolvimento de projetos para a produção do hidrogênio verde, em consórcio com grupos empresariais estrangeiros.

A Bahia anunciou a primeira fábrica brasileira para produção de H₂V em escala industrial parceria da Unigel com a ThyssenKrupp, com investimento de US\$ 120 milhões. A empresa baiana Quinto Energy desenvolve projeto de hidrogênio e amônia verde a partir da implantação de parques eólicos e solares, com 14 GW de capacidade instalada (BN, 2023). O governo do Ceará lançou a implantação do HUB de hidrogênio verde no Complexo do

³ Geração de energia eólica em parques instalados em ambiente marinho.

Pecém em fevereiro de 2021, com capacidade projetada de 6 GW até 2034, com previsão de início da produção entre 2026 e 2027 (Cruz; Gibaja, 2024).

O Rio Grande do Norte, um dos estados brasileiros de maior potencial eólico, sedia também projetos de produção de hidrogênio verde, em processo de desenvolvimento. O governo estadual, em agosto de 2021, assinou o primeiro memorando com a empresa Enterprize Energy para desenvolver projetos de geração de energia eólica *offshore* e de produção de Hidrogênio Verde. Em 2023, o portal do Governo do Estado divulgou a assinatura de mais um “Memorando de entendimento” no dia 14/08/2023, com a empresa Maturati Participações S.A. O objetivo é desenvolver ações de cooperação e intercâmbio técnico, institucional, econômico e ambiental, voltado ao desenvolvimento do projeto híbrido “Morro pintado” para geração de energia fotovoltaica, eólica e produção de hidrogênio verde (Rio Grande do Norte, 2023).

A imprensa local noticiou em 2023 que o Estado já assinou 12 memorandos de entendimento com empresas nacionais e internacionais sobre hidrogênio verde; a empresa Nordex em associação com a Acionam entrou com pedido de licenciamento junto ao IDEMA⁴ para a implantação do Complexo Industrial para produção de hidrogênio e amônia verde - Alto dos Ventos, em Macau/RN; e iniciou a implementação do projeto para construção e operacionalização do “Porto-indústria Verde” a ser construído no Município de Caiçara do Norte/RN, com previsão de início das obras para 2026 (Tribuna do Norte, 2023).

O processo de produção do hidrogênio verde em terras potiguares prevê a utilização da técnica da eletrólise, pela qual se decompõe a água em oxigênio e hidrogênio. A eletricidade utilizada poderá ser fornecida por uma fonte ou por associação de fontes renováveis como a eólica e a fotovoltaica. A água utilizada será a própria água do mar, após dessalinização⁵. Entretanto, não se conhecem projetos locais relacionados ao uso de hidrogênio verde, nem outros objetivos da pretendida produção que não seja a exportação para a Europa, ou se haverá benefícios para as comunidades locais.

6. REGULAÇÃO NACIONAL E ESTADUAL

A resolução Conselho Nacional de Política Energética nº 6, de 20 de abril de 2021, do Conselho Nacional de Política Energética, determinou a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), estabelecendo os objetivos, os eixos, as diretrizes e a governança do programa (BRASIL, 2021).

⁴ Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte.

⁵ Informação publicada in: EPBR, 11 ago. 2021 – Rio grande do Norte assina acordo para hidrogênio verde e eólicas *offshore*.

O PNH2 destaca como objetivos o desenvolvimento e a consolidação do mercado de hidrogênio, a inserção do país no mercado internacional de forma competitiva, a contribuição global para uma matriz energética de baixo carbono e garantir ao país alcançar a liderança no tema transição energética. As diretrizes estão distribuídas em seis eixos e compreendem o Fortalecimento das bases científicas e tecnológicas, a Capacitação de recursos humanos, o Planejamento energético, o Arcabouço regulatório-normativo e a Cooperação internacional. A governança será exercida por um Conselho gestor formado com as partes interessadas no programa (BRASIL, 2021).

O projeto de Lei 5816/2023, de autoria dos senadores Fernando Dueire (MDB/PE), Astronauta Marcos Pontes (PL/SP) e Cid Gomes (PDT/CE), dispõe sobre a indústria do hidrogênio de baixo carbono, suas tipificações, estrutura e fontes de recursos. Foi apresentado ao Senado e aprovada na Comissão Especial para Debates de Políticas Públicas sobre Hidrogênio Verde. Em seguida foi encaminhado à Câmara Federal, distribuído no dia 28/12/2023 para tramitação na casa revisora.

Considerando que a regulação, como parte da política pública para o hidrogênio verde, atende aos requisitos da segurança jurídica e da proteção dos interesses sociais e que a inexistência desta em âmbito nacional torna os entes locais mais vulneráveis e expostos a pressões variadas, os Estados têm se empenhado em formular e aprovar normas estaduais.

Na Região Nordeste, os Estados da Bahia e do Ceará foram os primeiros a iniciar o processo e a primeira Lei aprovada foi cearense, a Lei estadual nº 18.459/2023 (ALECE, 2023). A referida Lei institui a política estadual do hidrogênio verde e cria o conselho estadual de governança.

O projeto de Lei do Rio Grande do Norte foi apresentado à Assembleia legislativa em novembro de 2023, com o objetivo expresso de regular e o programa estadual de hidrogênio verde e de sua industrialização, conforme o texto original:

Institui o Marco Legal do Setor de Hidrogênio Verde e da Indústria Verde no Estado do Rio Grande do Norte, cria o Programa Norte-Rio-Grandense de Hidrogênio Verde e da Indústria Verde (PNRH2V), altera as Leis Estaduais nº 6.967, de 30 de dezembro de 1996, e nº 10.934, de 17 de junho de 2021, e dá outras providências.

A justificativa apresentada pelo governo do Estado não gera dúvidas sobre o objetivo principal de exportação e atendimento do mercado internacional e reconhece que o H2V produzido no Rio Grande do Norte poderá contribuir para atender o mercado nacional e o processo interno de descarbonização e, adicionalmente, poderá impulsionar a industrialização verde local. O referido projeto de Lei normatiza as atividades de produção, armazenamento,

transporte e uso do hidrogênio verde e de seus derivados; estabelece a política de incentivos fiscais, tributários; discute a certificação e cria a governança do programa (ALERN, 2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente texto, procura-se contextualizar o surgimento e desenvolvimento do debate sobre as potencialidades e importância do novo vetor energético, o hidrogênio verde, para abordar o objetivo principal a que se propõe o trabalho, que são os desafios da regulação de sua produção no Rio Grande do Norte.

O questionamento do paradigma baseado nas energias fósseis surge, inicialmente, em busca da preservação do meio ambiente e, em seu desenvolvimento, se entrelaça com as temáticas relacionadas às desigualdades e à necessidade de encontrar novos caminhos para o desenvolvimento, que não ameace a continuidade da vida humana no planeta.

A necessidade de adoção de um novo padrão energético que permita progressivamente eliminar as emissões de GEE são vislumbradas desde final do século XX e impulsionaram os compromissos de mitigação dos impactos ambientais, conforme as resoluções apontadas nos fóruns das organizações internacionais como os da Organização das Nações Unidas.

As novas tecnologias e o avanço da geração de novas energias renováveis, com destaque para a energia eólica e fotovoltaica, resultam desse processo. Também resulta do mesmo processo os acordos de cooperação internacional em variados campos, as resoluções das COPs e os tratados internacionais para estabilizar, reduzir e eliminar as emissões, dos quais o Acordo de Paris foi o mais avançado, ao estabelecer compromisso global para evitar o aquecimento do planeta acima de 1,5°C, como forma de evitar alterações climáticas irreversíveis.

Os relatórios das agências internacionais de energia demonstram a existência de recursos naturais e de tecnologia em dimensão capaz de responder aos desafios de evitar as alterações climáticas irreversíveis, desde que a essa perspectiva seja dada atenção prioritária. Entretanto, o relatório de 2023 do Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas (IPCC) alerta para a elevação da temperatura da terra de forma rápida, o que diminui o espaço de tempo e a margem de atuação humana.

A situação de emergência climática e o ambiente geopolítico conflituoso - com guerras localizadas envolvendo várias nações – contribuem para certa aceleração da transição energética, na qual o hidrogênio verde é considerado como fator determinante, principalmente

para garantir a descarbonização da indústria química e siderúrgica, o transporte de carga, a aviação e navegação de longo curso.

A mudança de padrão energético e a facilidade de produção da energia renovável nos vários continentes poderão implicar em alterações na base estrutural, econômica e social da sociedade de forma ainda não dimensionada. Nesse sentido, a normatização, nacional e local, aliada à cooperação internacional são de grande importância para que a economia verde possa responder aos desafios de superação das ameaças climáticas e da desigualdade entre países e entre pessoas.

Os países considerados pioneiros no debate do hidrogênio têm buscado a elaboração de estratégias que alia as demandas internas com o desafio da economia verde, caso da União Europeia com o seu Pacto Ecológico Verde e os Atos Delegados para estabelecer o limite mínimo de redução das emissões com os combustíveis verdes e a metodologia de sua produção. No mesmo sentido pode ser destacada a estratégia nacional do Chile para o hidrogênio verde, que destaca como prioridade atender as demandas internas aliadas ao propósito de dinamizar as comunidades locais e a perspectiva da exportação é postergada para o período pós 2030.

No caso do Brasil, observa-se o crescimento do número de projetos em desenvolvimento nos estados, sem que o país tenha ainda definido os objetivos e as rotas a serem adotadas. Na ausência de normatividade nacional abrangente para a economia do hidrogênio, os estados procuram dar abrigo aos investimentos de variadas formas. A Bahia instituiu seu Plano Estadual para a Economia do Hidrogênio Verde por decreto do Poder Executivo, o Decreto 21.200/2022, e em julho do mesmo ano foi lançada a pedra fundamental para a construção da primeira fábrica de hidrogênio no país (Camaçari, 2022).

O Estado do Ceará aprovou a Lei que instituiu o Programa Estadual do Hidrogênio em setembro de 2023, mas as ações institucionais para a instalação de um Hub de hidrogênio verde no Complexo Industrial Portuário do Pecém tiveram início em 2021, quando o governo assinou Memorando de Entendimento com a empresa Engie para a produção de hidrogênio verde. (Marques; Maia, 2023)

No Rio Grande do Norte o processo é semelhante: o governo do estado assinou o primeiro memorando para a produção de hidrogênio em 2021, em 2023 foi lançado o empreendimento Porto Indústria verde para a produção de hidrogênio verde e em novembro do mesmo ano o governo estado encaminhou o projeto de Lei estadual para deliberação na Assembleia Legislativa estadual.

A observação mais detida do referido projeto de Lei revela a ausência de preceitos relativos à salva guarda dos direitos e dos interesses locais como a preservação das atividades tradicionais, as compensações e medidas de interação com as atividades dos municípios do entorno. Esses são temas sensíveis, que na experiência com a produção de energia eólica e solar foram severamente impactados e, até o presente, o estado não consegue responder nem determinar a responsabilidade.

Mesmo que o marco legal estadual esteja ainda em fase de tramitação, a previsão orçamentária para os Estudos de viabilidade do Porto-Industria Verde de Caiçara está garantida no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Por ocasião do lançamento do PAC no Estado o tema foi publicizado (G1 RN, 2023). Ainda, na perspectiva do empreendimento de Caiçara, se avolumam junto ao IBAMA os pedidos de licenciamento para a instalação dos parques *offshore* para ampliação da produção de energia eólica.

O planejamento e as políticas públicas que venham a ser implementadas quanto à produção de hidrogênio são primordiais para uma trajetória segura e justa, capaz de compatibilizar o desafio da transição energética com o desafio do desenvolvimento local e dos interesses das partes envolvidas. No entanto, o projeto de regulação estadual em curso se limita à garantir a segurança jurídica dos empreendedores, uma vez que o aspecto da proteção dos interesses sociais não está contemplada.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Boletim anual 2023**. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf> Acesso em: 29 jan. 2024.

ABEEÓLICA. **InfoVento 32**, 2024. Disponível em: https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/09/424_ABEEOLICA_INFOVENTO_N32_PT_V4.pdf Acesso em: 30 jan. 2024.

ALECE. **Lei nº 18.459, de 07/09/2023**. Diário Oficial Eletrônico da Assembleia Legislativa do Ceará. Disponível em: [https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/organizacao-tematica/meio-ambiente-e-desenvolvimento-do-semiarido/item/8476-lei-n-18-459-de-07-09-23-d-o-11-09-23#:~:text=11.09.23\),-tamanho%20da%20fonte&text=INSTITUI%20A%20POL%C3%8DTICA%20ESTADUAL%20DO,GVERNADOR%20DO%20ESTADO%20DO%20CEAR%C3%81](https://belt.al.ce.gov.br/index.php/legislacao-do-ceara/organizacao-tematica/meio-ambiente-e-desenvolvimento-do-semiarido/item/8476-lei-n-18-459-de-07-09-23-d-o-11-09-23#:~:text=11.09.23),-tamanho%20da%20fonte&text=INSTITUI%20A%20POL%C3%8DTICA%20ESTADUAL%20DO,GVERNADOR%20DO%20ESTADO%20DO%20CEAR%C3%81). Acesso em: 29 jan. 2024.

ALERN. **Projeto de Lei nº 499/2023**. Diário Oficial Eletrônico. Assembleia Legislativa do Rio Grande do Norte. 30 de novembro de 2023 – Ano VI – nº 1214. Disponível em: <http://www.al.rn.gov.br/diariooficial> Acesso em: 18 jan. 2024.

BAHIA NOTÍCIAS. **Bahia e Ceará duelam pelo protagonismo em hidrogênio verde no Nordeste**. Bahia Notícias, 28 de novembro de 2023, 19:00. Disponível em:

<https://www.bahianoticias.com.br/noticia/286646-bahia-e-ceara-duelam-pelo-protagonismo-em-hidrogenio-verde-no-nordeste> Acesso em: 24 jan. 2024.

BAHIA. Governo Institui Plano Estadual para a Economia do Hidrogênio Verde. Casa Civil. O portal oficial do Estado da Bahia. 03 de março de 2022. Disponível em: <http://www.casacivil.ba.gov.br/2022/03/1560/Governo-institui-Plano-Estadual-para-a-Economia-do-Hidrogenio-Verde.html>. Acesso em: 29 jan. 2024.

BRASIL. Programa Nacional do Hidrogênio - PNH2. Ministério das Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogenioRelatriodiretrizes.pdf> Acesso em: 20 jan. 2024.

BRASIL. Projeto de Lei nº 5816 de 2023. Congresso Nacional, 2023. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-5816-2023> Acesso em: 15 jan. 2024.

CAMAÇARI. Camaçari terá a 1ª fábrica de hidrogênio verde em escala industrial do Brasil. Prefeitura de Camaçari, ASCOM, 26/07/2022 – 04:07:12. Disponível em: <https://www.camacari.ba.gov.br/camacari-tera-1a-fabrica-de-hidrogenio-verde-em-escala-industrial-do-brasil/> Acesso em: 21 jan. 2024.

CASTRO, Nivalde. A economia do hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Organização Nivalde de Castro ... [et al.]. - 1. ed. - Rio de Janeiro: E-papers, 2023. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf Acesso em: 27 jan. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Plano REPowerEU. Bruxelas, 2022. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=ES#:~:text=A%20an%C3%A1lise%20da%20Comiss%C3%A3o%20indica,Esse%20investimento%20compensar%C3%A1>. Acesso em 27 jan. 2024

COSTA, Rafael. Ventos que transformam? Um estudo sobre o impacto econômico e social da instalação dos parques eólicos no Rio Grande do Norte/Brasil. 2015. Dissertação, programa de pós-graduação em Estudos Urbanos e Regionais – PPEUR, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes - CCHLA, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/23017> Acesso em: 28 jan. 2024.

CRUZ, Joana e GIBAJA, Carlos. Com grande potencial em energias renováveis, o Ceará está se tornando a casa do hidrogênio verde. Governo do Estado do Ceará, 01 de janeiro de 2022, 12:28. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2024/01/01/com-grande-potencial-em-energias-renovaveis-o-ceara-esta-se-tornando-a-casa-do-hidrogenio-verde/> Acesso em: 23 jan. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Nacional de Energia: ano base 2022. 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf Acesso em: 29 de jan. 2024.

G1 RN. Governo detalha 8 projetos do RN incluídos no Novo PAC. 14/08/2023 14h54. Disponível em: [Governo detalha 8 projetos do RN incluídos no Novo PAC; confirma | Rio Grande do Norte | G1 \(globo.com\)](https://g1.globo.com/rn/noticia/2023/08/14/governo-detalha-8-projetos-do-rn-incluidos-no-novo-pac-confirma-rio-grande-do-norte-g1.globo.com) Acesso em: 21 jan. 2024.

GIDDENS, Anthony. **A política das mudanças climáticas**. Rio de Janeiro, Zahar, 2010. p.37-56; 202-224. Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1fkhL1_D7GJ45brpmwwO8QgYvUZ-TG32w Acesso em: 31 ago 18 jan. 2024.

GOV.BR **Mapa de obras por estado**. Novo PAC. Desenvolvimento e sustentabilidade. Casa civil. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/mapas-de-obras-por-estados> Acesso em: 21 jan. 2024.

IBGE. **Desemprego**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/desemprego.php> Acesso em: 30 jan. 2024.

IRENA. **Geopolítica de la transformación energética: el factor hidrogeno**. Agencia Internacional de Energías Renovables, *Abu Dhabi*, 2022. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/IRENA_Geopolitics_Hydrogen_2022_ES.pdf?rev=9fa707770ae44b938e88a24d54079dcf Acesso em: 20 jan. 2024.

IRENA. **Renewable energy statistics 2023**, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2023.pdf?rev=7b2f44c294b84cad9a27fc24949d2134 Acesso em: 18 jan. 2024.

LEE, Hoesung. ROMERO, José. (org.) **Climate change 2023 Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - *IPCC*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf Acesso em: 21 jan. 2024.

MACÊDO, Luziene. **Produção de energia elétrica por fonte eólica no Brasil e aspectos de seu impacto na Região Nordeste e Rio Grande do Norte**, 2015. Tese. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente - PPDEEMA, Instituto de Economia – IE, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/949591> Acesso em: 18 jan. 2024.

MARQUES, Ana Vitória. MAIA, Geimison. **Ceará se destaca com pioneirismo na corrida do hidrogênio verde**. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará – ALECE, 22/05/2023 – 12:00. Disponível em: <https://www.al.ce.gov.br/noticias/ceara-se-destaca-com-pioneirismo-na-corrída-do-hidrogenio-verde> Acesso em: 22 jan. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris sobre o clima**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima> Acesso em: 22 jan. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Convenção-quadro das Mudanças Climáticas**. 1992. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf> Acesso em 29 jan. 2024.

RIO GRANDE DO NORTE. **Memorando de entendimento deve consolidar projeto híbrido de energia renováveis**. Governo do Rio Grande do Norte. Secretaria do Desenvolvimento Econômico, da Ciência, da Tecnologia e da Inovação, ASSECOM, 15/08/2023, 08:41. Disponível em: <http://www.sedec.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=315492&ACT=&PAGE=0&PARM=&LBL=ACERVO+DE+MAT%C9RIAS> Acesso em: 30 jan. 2024.

IBGE. **Desemprego**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/desemprego.php> Acesso em: 30 jan. 2024.

DESCARBONIZAÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS DE FORTALEZA: Dimensionamento de Infraestruturas de Produção de Hidrogênio Verde via Energia Eólica

Autor: Hariel Abreu Pereira (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE)

Co-Autores: João José Moura Vieira (Universidade Federal do Ceará - UFC);
Ana Carolina Miranda Magalhães (Universidade Federal do Ceará - UFC);
William Magalhães Barcellos (Universidade Federal do Ceará - UFC);
Auzuir Ripardo de Alexandria (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE)

Responsável pela apresentação: Hariel Abreu Pereira

RESUMO

A extensa utilização de combustíveis fósseis como principal fonte de energia na economia desde a Segunda Revolução Industrial provocou um substancial aumento na concentração de Gases de Efeito Estufa (GEEs) na atmosfera. Essa elevação nos níveis de GEEs que por séculos foi negligenciada, vem resultando em impactos ambientais significativos em várias regiões do planeta, atingindo, inclusive, algumas áreas do Brasil particularmente vulneráveis. Destaca-se, nesse contexto, a importância da Descarbonização dos Transportes. Este setor, sendo o segundo maior poluidor da atmosfera, não apenas contribui para questões climáticas globais, mas também gera problemas locais, principalmente nas grandes cidades brasileiras, como a poluição sonora. Nesse sentido, este trabalho propõe o dimensionamento das infraestruturas de geração de Energias Renováveis e produção de Hidrogênio Verde direcionado à Descarbonização integral da Frota de Transporte Coletivo Urbano da Cidade de Fortaleza, no Brasil. Essa ação de descarbonização se dá por meio da substituição dos veículos tradicionais, com sistemas de propulsão movidos à diesel, por Ônibus com Células de Combustível à Hidrogênio. Para atender a demanda da proposta de implantação no município de Fortaleza, é necessário produzir 37.819,32 kg de hidrogênio por dia. Dessa forma, propõe-se a caracterização de subsistemas de produção, armazenamento, compressão e abastecimento, por meio do dimensionamento e de análises energética, econômica e de logística. Os resultados revelaram uma demanda de geração anual de energia elétrica de 766.93 GWh para suprir o consumo de todos os subsistemas contemplados por esta proposta. Nesse sentido, foi dimensionada uma Usina Eólica com capacidade de 840 GWh anuais. Por fim, a avaliação econômica dessa proposta indicou uma economia de US\$ 359.541.391,20 no tempo de vida útil da maioria dos equipamentos e um payback simples do investimento em 13 anos.

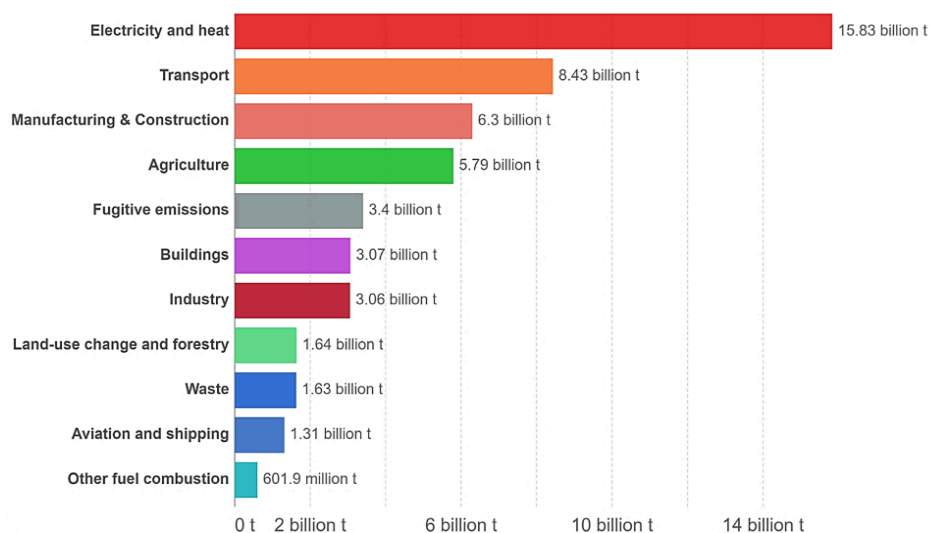
Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Energia Eólica; Descarbonização; Transporte Público.

1 INTRODUÇÃO

As inovações tecnológicas decorrentes das Revoluções Industriais ocorridas desde meados do século XVIII, sobretudo a Máquina a Vapor e o Motor à Combustão Interna (MCI) possibilitaram o desenvolvimento da sociedade ao patamar atual. No entanto, também foram impulsionadas as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), a exemplo do Dióxido de Carbono (CO₂) e dos Óxidos de Nitrogênio (NO_x), elevando a concentração dessas substâncias na atmosfera.

Nesse contexto, estima-se um aumento na concentração de CO₂ de cerca de 280 partes por milhão (ppm), na Era pré-Industrial, para mais de 400 ppm na última década, o que já provoca impactos sensíveis em diversas regiões do planeta e é apontado como principal causa do Aquecimento Global (LAN *et al.*, 2023). Além disso, outros GEEs também desencadeiam alterações climáticas com base na sua capacidade de reter o calor proveniente da radiação solar na atmosfera, dessa forma, o índice de Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*) mede essa característica dos GEEs, atribuindo o valor de 1 ao CO₂, o que permite comparar os impactos nocivos de diferentes emissões com base na unidade CO_{2eq} (CO₂ equivalente) (IPCC, 2021).

Figura 1: Níveis de Emissões dos Setores Econômicos.



Fonte: Adaptado de Our World in Data, 2019.

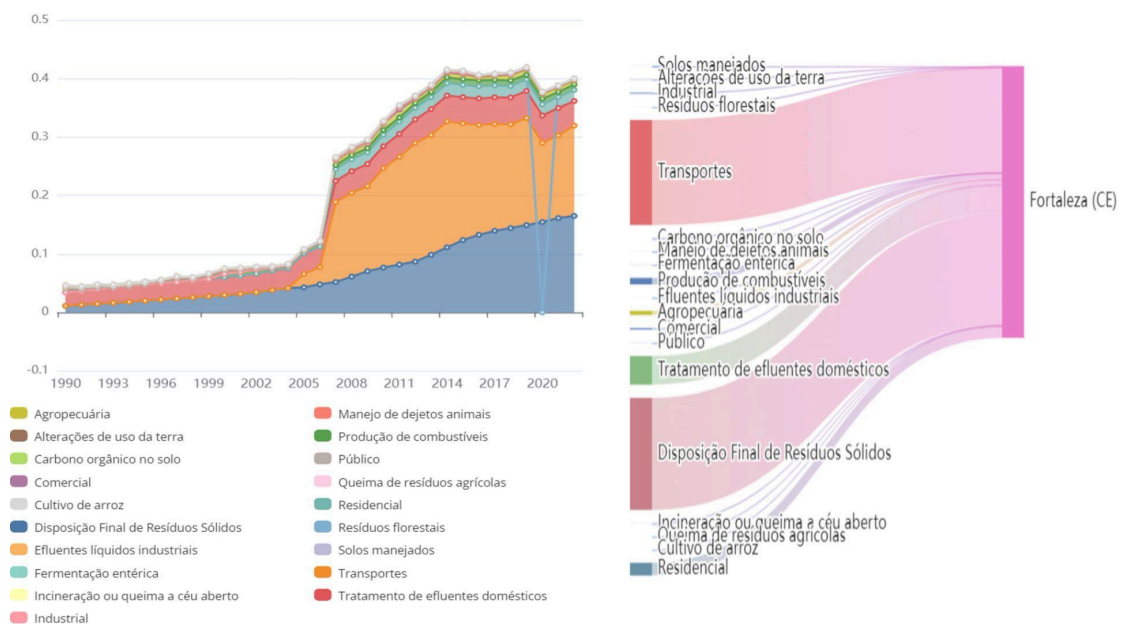
Nesse sentido, a Figura 1 destaca a contribuição de cada setor da economia global em emissões de GEEs, utilizando a unidade CO_{2eq} como parâmetro, evidenciando o protagonismo dos transportes em termos de poluição atmosférica.

Nas cidades, devido ao adensamento urbano, essa tendência é ainda mais salientada. Para mensurar isso,

O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) é uma iniciativa do Observatório do Clima que compreende a produção de estimativas anuais das emissões de gases de efeito estufa no Brasil, documentos analíticos sobre a evolução das emissões e uma plataforma digital que abriga os dados do sistema e sua metodologia (SEEG, 2023).

Sendo assim, a Figura 2 ilustra dois gráficos que permitem a visualização do crescimento das emissões de GEEs em CO_{2eq} na cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, no Brasil, por atividade econômica, em que é enfatizado o maior impacto do Setor de Transportes, com quase a totalidade das emissões relacionadas aos modais rodoviários, entre eles o Transporte Coletivo.

Figura 2: Série Histórica de Emissões em Fortaleza/CE.



Fonte: SEEG, 2023.

Com o intuito de enfrentar esse cenário, foi traçado o Plano Fortaleza 2040 durante a gestão do ex-prefeito Roberto Cláudio, que consiste em uma rota para o desenvolvimento sustentável da capital cearense até 2040. Entre os sete eixos estratégicos que compõem o Plano Fortaleza 2040, o Eixo 4 se destaca pelo foco na criação de uma Cidade Ambientalmente Sustentável, adotando 3 estratégias, com destaque à Estratégia 2:

Os potenciais energéticos de Fortaleza, a saber: eficiência no consumo; geração distribuída de energia elétrica e aproveitamento energético de resíduos, deverão ser executados de forma integrada, estimulando e fomentando a atração de investimentos públicos e privados, resultando em uma cadeia produtiva sólida, eficiente, confiável e competitiva, e

fomentando um ambiente fértil para o desenvolvimento científico e tecnológico de soluções energéticas e o empreendedorismo de negócios inovadores (FORTALEZA, 2016).

Dessa maneira, fica evidente o interesse do Poder Executivo do município, na forma de política de Estado, em combater as mudanças climáticas por meio de ações multifacetadas, incluindo o aproveitamento dos potenciais energéticos da cidade. Sendo assim, iniciativas que visem à descarbonização de setores estratégicos como os Transportes que, além de figurar entre os responsáveis pela poluição atmosférica em Fortaleza, também fazem parte do cotidiano dos fortalezenses, tendem a ser valorizados pelo Poder Público.

Para isso, no intuito de compreender o atual estado do sistema de transportes coletivos de Fortaleza, a Divisão de Planejamento (DIPLA), da Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza (ETUFOR) detalha a frota de ônibus com 2029 veículos. No entanto, este contingente encontra-se reduzido em virtude da diminuição da utilização do transporte coletivo pós-pandemia da Covid-19, para este trabalho, foi considerada uma frota ativa de 1680 veículos, que percorrem uma distância média diária de 205 quilômetros.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo geral propor a descarbonização da frota de ônibus do município de Fortaleza, visando à troca dos modais coletivos viários com enfoque na substituição dos modelos tradicionais com MCIs à diesel por um veículos com células a combustível, a partir do dimensionamento de estações de produção de Hidrogênio Verde via Energia Eólica.

Concomitantemente, para a efetivação da proposta deste trabalho, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

a) Caracterizar os subsistemas de produção, de compressão, de armazenamento e de reabastecimento de hidrogênio, determinando os fluxos energéticos envolvidos na substituição total da frota de ônibus de Fortaleza por Ônibus com células a combustível à Hidrogênio (FCEBs, do inglês *Fuel Cell Electric Buses*);

b) Dimensionar uma Usina Eólica com capacidade de geração de energia suficiente para suprir o consumo energético de todos os subsistemas dimensionados;

c) Analisar economicamente a substituição da frota de ônibus atual por FCEBs, avaliando os custos de infraestrutura e de substituição dos veículos.

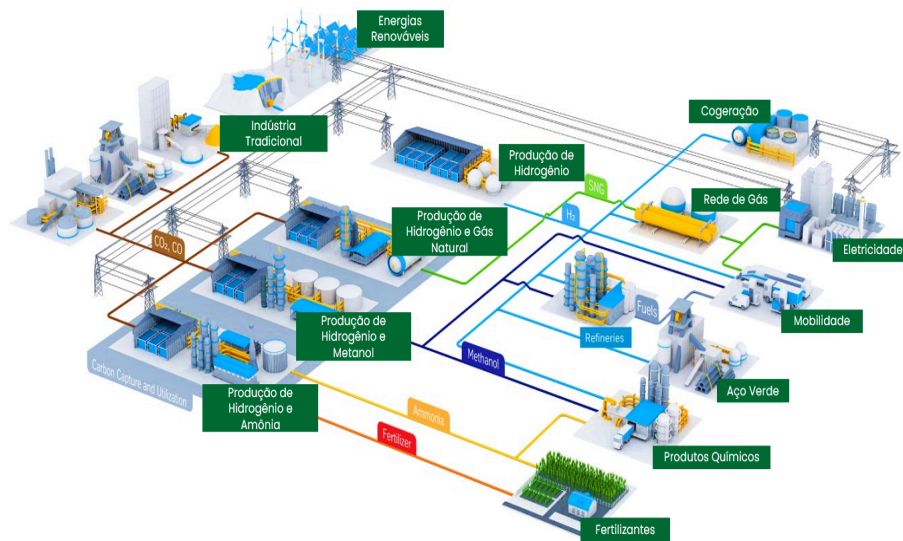
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia Eólica e Tecnologias do Hidrogênio

A Energia dos Ventos é utilizada para a movimentação de equipamentos criados pelos seres humanos desde as primeiras civilizações, sobretudo na navegação e no bombeamento de água em benefício à colheita de grãos. “Porém, somente a partir do século XII, esse tipo de energia foi disseminado para a Inglaterra, França e Holanda, e logo depois, espalhado por toda a Europa” (FONTANET, 2012).

As principais partes de um aerogerador são: Pás eólicas, responsáveis pela captação da energia mecânica dos ventos por meio do perfil aerodinâmico, convertendo sua potência ao rotor; Rotor, elemento de fixação das pás e de transmissão do movimento aos eixos internos da nacelle; Nacelle, responsável pela transformação da rotação em energia elétrica; Torre e fundação, responsáveis pela elevação da altitude dos demais componentes, bem como pela sua sustentação (NEOENERGIA, 2021).

Figura 3: Cadeia de Valor do Hidrogênio.



Fonte: Adaptado de Thyssenkrupp (2023).

Já “a tecnologia do hidrogênio refere-se ao conjunto de dispositivos e conhecimentos que possibilitam o aproveitamento do hidrogênio como vetor energético, compreendendo toda a cadeia de utilização: produção, armazenamento, transporte, distribuição e uso final” (GODOY, 2013). O Hidrogênio emerge como uma alternativa aos combustíveis fósseis, visto que, em sua forma molecular (H_2), é um gás com densidade de $0,08987 \text{ kg.m}^{-3}$ a 0°C e 1

bar, e poder calorífico inferior (PCI) de 119.960 kJ./kg (SILVA, 1991). A baixa densidade aliada ao alto teor energético confere uma vasta gama de aplicações ainda pouco exploradas na economia global, tais como demonstradas na Figura 3 (THYSSENKRUPP, 2023).

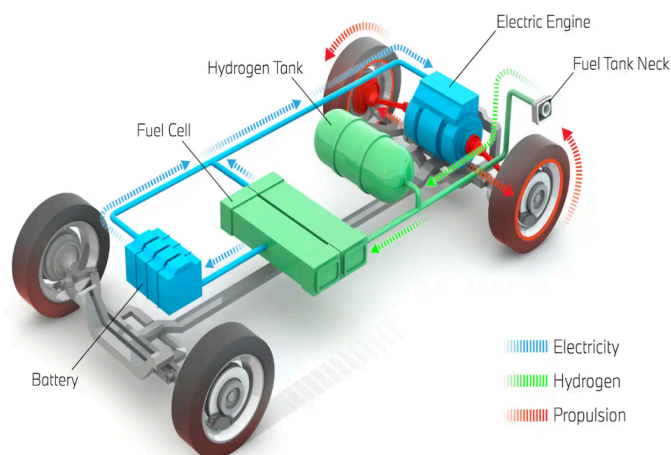
Em vista disso, pode-se afirmar que o Hidrogênio possui utilizações similares ao petróleo e seus derivados, podendo então, atuar como vetor energético no contexto de uma economia global descarbonizada, sobretudo com a queda nos custos nivelados das fontes de Energias Renováveis.

2.2 Ônibus com Célula de Combustível a Hidrogênio

Um dos destaques da cadeia de valor do Hidrogênio Verde é a aplicação desse combustível em transportes de pessoas e de cargas. Nesse contexto, os veículos com células a combustível (FCEVs, do inglês *Fuel Cell Electric Vehicles*) são alternativas viáveis para a descarbonização. (HYDROGEN COUNCIL, 2021).

Os FCEBs se destacam por apresentar carga reduzida, maior durabilidade, autonomia estendida e tempos de abastecimento mais rápidos em comparação com os ônibus elétricos com baterias. Isso sugere que possuem melhores perspectivas de implementação em nível local e regional para a descarbonização dos transportes coletivos. Embora essa possibilidade de utilização do Hidrogênio em transportes possa parecer complexa, na realidade, esse tipo de aplicação é relativamente simples e oferece diversas vantagens mecânicas, além da redução de emissões de GEEs. A Figura 4 apresenta um esquema básico de funcionamento de um FCEB, com tecnologia atual de acionamento híbrido.

Figura 4: Diagrama de funcionamento de um FCEB.



Fonte: BMW (2022).

4 METODOLOGIA

- **Cálculo da Demanda**

O ponto de partida para o dimensionamento proposto por este trabalho é o cálculo da Demanda de Hidrogênio no cenário de substituição total da frota de ônibus coletivos de Fortaleza, atualmente movida à Diesel por FCEBs do modelo Urbino 12 Hydrogen, da fabricante Solaris. Esse veículo possui motor elétrico de acionamento integrado próximo às rodas de potência máxima do motor de tração de 250 kW, alimentado por uma Célula a Combustível, tipo PEM e um conjunto de baterias de íons de lítio, ambos com 70 kW, e com um tanque de armazenamento de hidrogênio que totaliza 37,5 kg à pressão de 350 bar, proporcionando uma autonomia de até 340 km sem necessidade de reabastecimento (SOLARIS, 2021).

A demanda D_{H_2} , em kg/dia, é dada pela Equação X, em que Q_v é a quantidade de veículos que compõem a frota ativa, C_m é o consumo médio típico de um FCEB, considerando um gasto de 2kg de Hidrogênio a mais para cada 100km rodados em virtude da climatização necessária na cidade de Fortaleza, isto é, 0,11 kg/km e D_d é a distância média percorrida por dia por veículo.

$$D_{H_2} = (Q_v \cdot C_m \cdot D_d) \quad (1)$$

Portanto, há uma demanda equivalente a 37.819,32 kg/dia de hidrogênio, o que pressupõe uma necessidade de produção de hidrogênio a uma vazão de 1575,8 kg/h, considerando um ritmo de operação diária de 24h nas Estações de Eletrólise. Essa vazão horária é relevante, tendo em vista que as especificações da maioria dos eletrolisadores é dada nesta unidade.

- **Análise Energética**

A Análise Energética objetiva o balanço das energias de entrada e de saída em cada um dos volumes de controle considerados, bem como as perdas energéticas associadas. Nesse sentido, para fins de simplificação, o processo que compreende desde a produção do hidrogênio até o abastecimento dos veículos será tratado como 95% eletrointensivo, isto é, 95% da energia gerada deverá ser destinada ao consumo das unidades de eletrólise, enquanto o restante deverá ser destinado ao processo de compressão e sustentação energética das HRSs.

Assim, o produto entre a demanda de produção de hidrogênio, em kg/h, multiplicada pelo consumo de energia por quilograma de gás produzido indicado

pelo fabricante, em kWh/kg, resulta na demanda energética do principal componente do conjunto, que representa 95% do saldo energético que deve ser fornecido para a substituição da frota. Vale ressaltar que o Hidrogênio possui um poder calorífico de 119.960 kJ/kg, que, efetivando as devidas conversões, resulta em 33,32 kWh/kg, ou seja, o quantitativo energético que efetivamente é convertido em hidrogênio pode ser obtido por meio da multiplicação desse PCI pela demanda, dessa forma também obteve-se a eficiência de 84%.

- **Análise Econômica**

Para a efetivação da solução proposta por esse trabalho, a análise econômica é substancialmente relevante em virtude da necessidade de envolvimento de diversas entidades públicas e privadas relacionadas à Mobilidade Urbana. Nesse sentido, os dados de custo de aquisição, operação, manutenção e vida útil dos equipamentos conforme dimensionado na Análise Energética, foram obtidos por meio de pesquisas disponibilizadas na literatura referenciada, expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Análise Econômica de equipamentos.

Equipamento	Custo de Aquisição	Vida Útil
Usina Eólica	1.473 US\$/kW (IRENA, 2020)	30 anos (WISER; BOLLINGER, 2019)
Eletrolisadores	$3.424 * P^{0,885}$ US\$ (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)	20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)
Compressores	$40.035 * P^{0,6035}$ US\$ (MICENA, 2020)	20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)
Tanques de Baixa Pressão	1.001 US\$/kg (MICENA, 2020)	20 anos (MICENA, 2020)
Tanques de Alta Pressão	1.534 US\$/kg (FCH JU, 2017)	20 anos (FCH JU, 2017)
Subsistemas de Operação e Manutenção	285 US\$/kg/dia (MICENA, 2020)	20 anos (MICENA, 2020)
HRS	1,13 US\$/kg/dia (FCH JU, 2017)	20 anos (GRÜGER <i>et al.</i> , 2018)

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de FCH JU (2017), Gröger *et al.* (2018), IRENA (2020), Micena (2020) e Wiser; Bollinger (2019).

Em outra perspectiva, a efetivação da proposta deste trabalho promove diversos benefícios além da diminuição dos gastos com a compra de combustíveis fósseis, sobretudo a redução do quantitativo de emissões de gases

nocivos na cidade. Nesse aspecto, segundo Paiva (2021), a quantificação dos impactos econômicos, relacionados sobretudo aos problemas ambientais e de saúde devidos à liberação de gases poluentes na atmosfera, é tradicionalmente associada à valoração de cada gás, cabendo ao Poder Público arcar com os custos decorrentes dessas emissões. A Tabela 2 contém os valores dos principais gases emitidos por veículos à MCI e a quantidade de cada gás emitida por quilômetro rodado em veículos pesados movidos a diesel em marcha lenta.

Tabela 2: Valoração de Gases Emitidos.

Gás	Valoração (US\$/t) (PAIVA, 2021)	Quantidade (g/km) (AGUIAR <i>et al.</i>, 2015)
CO ₂	108,21	≈ 0
CO	673,32	1,5
NO _x	3.445,08	1,89
SO _x	13.112,88	≈ 0
Hidrocarbonetos	2.980,41	0,17
Material Particulado	17.622,05	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Aguiar *et al.* (2015) e Paiva (2021).

5 RESULTADOS E CONCLUSÃO

No intuito de sintetizar a apresentação dos resultados obtidos a partir da execução da metodologia proposta, são subdivididos os itens:

- **Estações de Eletrólise**

No intuito de estabelecer uma base de cálculo, o **eletrolisador Siemens Silyzer 300**, possui uma taxa de produção de 330 kg/h no arranjo completo composto por 24 módulos (pilhas) do tipo PEMEC, a uma potência de 17,5 MW, com eficiência de 75,5%, consumo energético estimado de 39,45 kWh/kg, alimentação de água de 10 kg/kg de hidrogênio produzido e pressão de saída dos gases customizável. (SIEMENS, 2021).

Adotando como base duas instalações compostas por 3 eletrolisadores desse tipo, isto é, 52,5 MW de potência cada, é efetivada a produção total a uma vazão de 1980 kg/h, suficiente para abastecer totalmente a frota de FCEBs dimensionada para a cidade de Fortaleza, acrescida de uma folga de 25% para a previsão de expansão da frota e/ou redução no ritmo de produção dos eletrolisadores, no intuito de prolongar sua vida útil.

- **Sistemas Auxiliares**

Uma vez que o Hidrogênio foi produzido em quantidade suficiente para o abastecimento da frota, é necessária a sua correta disposição em **Estações de Reabastecimento de Hidrogênio** (HRS, do inglês *Hydrogen Refuelling Station*), em que as cargas ocorrem à pressão de 350 bar conforme o padrão J2601-2 da Sociedade de Engenharia Automotiva (SAE, do inglês *Society of Automotive Engineering*), a diferença substancial consiste no faturamento do combustível em quilogramas nas bombas. (CAPONI *et al.*, 2021).

Segundo o FCH JU (2017), uma HRS de grande porte possui capacidade de 6000 kg/dia de abastecimento, logo, considerando a demanda e a produção apresentadas, seriam necessárias 7 estações de reabastecimento para disponibilizar o hidrogênio produzido à frota.

No entanto, outra variável importante é o tempo de reabastecimento, já que, considerando um ritmo normal conforme o protocolo SAE J2601-2, de 3,6 kg/min, um FCEB do modelo selecionado levaria em torno de 10 min para ser completamente abastecido. Esse fato representa um total de 42 FCEBs abastecidos por hora em todas as HRS, isto é, seriam necessárias mais de 24h por dia de abastecimentos contínuos em cada estação para suprir a quantidade

de veículos da frota. Para contornar esse problema, será adotada a composição de 16 HRS com capacidade de 6000 kg/dia cada, resultando em uma rotina de abastecimento de 17,5h por dia para recarregar todos os FCEBs.

Vale ressaltar que o Hidrogênio precisa ser entregue na pressão de 350 bar, também conforme o protocolo SAE J2601-2, logo, o **Sistema de Compressão** dimensionado para este trabalho admite uma entrada diária equivalente à D_{H_2} proveniente dos eletrolisadores, a uma pressão de 20 bar, de acordo com especificações da fabricante, objetivando o aumento a níveis superiores a 350 bar ideais para o abastecimento nos FCEBs, nesse estudo, se estabelece o valor de 450 bar como referência para a análise energética do processo de compressão.

Nesse contexto, com o intuito de estabelecer uma base de cálculo com equipamentos comercialmente disponíveis, o compressor Sauer 6000 Series BasSealH2 possui especificações de pressurização equivalentes, a uma taxa máxima de 1000 m³/h com uma potência de 200 kW, em soluções modulares com 2, 3 e 4 estágios e 6 cilindros (SAUER, 2021). Em vista disso, considerando a densidade do hidrogênio de 0,08987 kg/m³, a taxa máxima de compressão é de 89,87 kg/h, sendo necessários portanto, associados a cada Estação de Eletrólise e considerando um ritmo de atuação de 10h por dia, um arranjo de 21 compressores desse modelo.

A estratégia de **armazenamento e distribuição** adotada neste estudo é a de produção de hidrogênio localizada em pontos periféricos da cidade, com fácil abastecimento de água e de energia elétrica, e de transporte do gás por meio de caminhões até às Estações de Reabastecimento distribuídas no interior de Fortaleza, em locais estratégicos como garagens, proximidades de terminais e inícios/fins de rotas. Dessa maneira, são dimensionados dois locais para armazenamento do gás.

O tanque de baixa pressão foi designado com capacidade para suportar metade da demanda diária em cada um dos pontos de produção, totalizando a disponibilidade de um dia para eventuais manutenções preventivas e/ou corretivas, além de falhas dos equipamentos. Logo, o tanque de baixa pressão, a 2 MPa e 27°C, deve ter capacidade de 18909,66 kg, com a densidade do hidrogênio de 1,61 kg/m³ nessas condições, segundo Micena (2020). Portanto, o volume do tanque de baixa pressão deve ser equivalente a 11.745,13 m³,

podendo também ser composto por um banco de tanques de menor volume. O tanque de alta pressão, por sua vez, foi designado com capacidade para suportar a demanda diária em cada um dos pontos de produção, totalizando a disponibilidade de dois dias para eventuais problemas de abastecimento ou de compressão. Logo, o tanque de alta pressão, a 45 MPa e 27° C, deve ter capacidade de 37891,32 kg, com a densidade do hidrogênio de 28.184 kg/m³ nessas condições, segundo CMB.Tech (2021). Portanto, o volume do tanque de alta pressão deve ser equivalente a 1.344,43 m³.

- **Usina Eólica**

Assume-se, neste trabalho, um sistema compensatório hipotético em que a energia gerada pelo Parque Eólico é injetada na rede elétrica e, conforme a demanda, consumida pelos equipamentos, desconsiderando os modelos tarifários e leilões de compra e venda de energia, tendo como único parâmetro o quantitativo energético anual, no intuito de focar a abordagem no aspecto técnico e nos custos de implantação dos empreendimentos. Nesse aspecto, a Usina Eólica deve produzir uma quantidade de energia anual equivalente a 365 vezes o consumo de energia elétrica diário dos equipamentos.

Considerando o modelo de aerogerador e a localidade escolhidos, com velocidade média dos ventos de 9,5 m/s e EAG de 28 GWh por aerogerador instalado, o Parque Eólico foi dimensionado com 30 aerogeradores, totalizando uma potência instalada de 180 MW, fornecendo 840 GWh à rede elétrica. Isso representa um quantitativo superior em 9,53% à demanda da proposta estabelecida por esse estudo, destinados, sobretudo, à compensação das perdas mecânicas e elétricas no processo de conversão energética, que equivale a 73,07 GWh.

A partir do dimensionamento, o layout proposto para o Parque Eólico é ilustrado na Figura 5, detalhando o posicionamento dos aerogeradores na área designada para o empreendimento, as áreas elípticas de distanciamento para a prevenção do “efeito esteira”, as conexões elétricas entre os aerogeradores e o posicionamento da subestação elevadora.

Figura 5: *Layout* de Usina Eólica proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Análise Econômica**

Em conformidade aos dimensionamentos dos subsistemas propostos por este estudo, foram calculados os custos com a aquisição dos equipamentos. Além disso, sobre esse valor foram adicionados os complementos de 5% para preparação do terreno, 10% para Engenharia, 5% para contingência e 3% para permissões (MICENA, 2020).

A Tabela 3 sintetiza os custos de aquisição dos equipamentos da tabela Y. Nesse aspecto, admite-se o valor de aproximadamente US\$ 657,6 milhões para a aquisição e instalação dos equipamentos, com vida útil igual ou superior a 20 anos. Ademais, é necessário considerar o custo anual do consumo de água para a eletrólise, com valores de 18,48 R\$/m³ indicados pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (Cagece) (2021) para categoria industrial, o dispêndio anual foi calculado em US\$ 455.533,70, considerando uma densidade de 1000 kg/m³.

Para estabelecer uma base comparativa, os custos com combustível para a frota atual de veículos à diesel, considerando um consumo médio de 0,40 L/km, e os mesmos parâmetros utilizados para o cálculo da demanda de hidrogênio, isto é, 1680 veículos em atividade e 205 km/dia de distância média percorrida,

obteve-se uma demanda diária de 137.524,8 L de diesel.

Tabela 3: Custo de Investimento em Equipamentos.

Equipamento	Quantidade	Investimento (US\$)
Usina Eólica	180 MW	265.140.000,00
Eletrolisador	105 MW	95.123.163,62
Compressores	2 x 21 x 200 kW	9.373.885,96
Tanques de Baixa Pressão	2 x 18.909,66 kg	37.857.139,32
Tanques de Alta Pressão	2 x 37.891,32 kg	116.250.569,80
Operação e Manutenção	37.891,32 kg/dia	10.799.026,20
Estações de Reabastecimento	16 x 6000 kg/dia	108.480,00
Investimento em Equipamentos		534.652.264,9
Preparação do Terreno (5%)		26.732.613,25
Engenharia (10%)		53.465.226,50
Contingência (5%)		26.732.613,25
Permissões (3%)		16.039.567,95
Investimento Total		657.622.285,82

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o preço do diesel de 5,67 R\$/L informado pela Petrobrás para janeiro de 2022 no Estado do Ceará, foi calculado um custo anual de US\$ 49.932.359,62. A infraestrutura de recarga dos ônibus à diesel já está estabelecida nos postos de abastecimento comuns da cidade, no entanto, o valor do diesel atinge valores mais altos a cada ano, com a expectativa de aumento ainda maior à medida que as grandes economias transitam para a descarbonização. Em vista disso, já é possível traçar expectativas de retorno financeiro a longo prazo, mesmo com a aquisição e instalação de toda a infraestrutura de produção do hidrogênio.

Tabela 4: Valores e emissões anuais em Fortaleza.

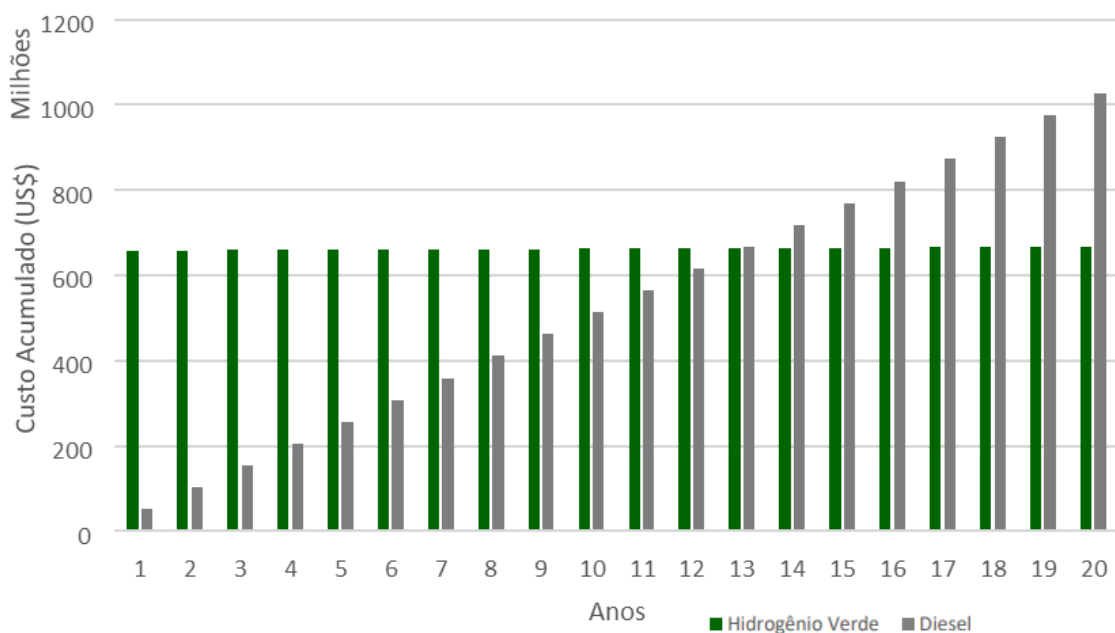
Gás Emitido	Quantidade (kg)	Valor Associado (US\$)
CO	188.237,07	126.743,78
NOx	237.178,71	817.099,62
Hidrocarbonetos	21.333,54	63.573,93
Material Particulado	21.333,54	375.940,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, no contexto da emissão de gases, a Tabela 4 sintetiza os valores anuais emitidos pela frota de ônibus atual e sua valoração respectiva, conforme a demanda de diesel calculada e os valores de referência. Dessa forma, US\$ 1.383.357,93 são gastos, em média, anualmente em decorrência dos problemas ambientais e de saúde relacionados à emissão de gases tóxicos. Isso totaliza um custo atual de US\$ 51.315.717,55 por ano relacionado ao combustível e às emissões decorrentes de sua combustão.

Sendo assim, a Figura 6 demonstra o comparativo entre o custo total acumulado, no período de 20 anos, para o abastecimento das duas modalidades de ônibus analisadas por este estudo, em que, para o Hidrogênio Verde consideram-se o investimento inicial em infraestrutura de aquisição e instalação dos equipamentos para sua produção e as entradas anuais relacionadas ao custo da água consumida, já para o diesel, consideram-se somente as entradas anuais relacionadas ao custo do combustível.

Figura 6: Comparativo entre combustíveis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 6 é possível notar o payback do investimento inicial em infraestrutura para produção do Hidrogênio Verde em 13 anos, totalizando uma economia, no tempo total de vida útil dos equipamentos, equivalente a US\$ 359.541.391,20.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, S. D. O. et al. Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta. *Transportes*, v. 23, n. 3, p. 35, 2015.

BMW Group. Como funcionam os carros de célula de combustível de hidrogênio. [BMW Group Website]. 2023.

CAPONI R, MONFORTI F A, BOCCI E, VALENTI G, DELLA PIETRA M. Thermodynamic modeling of hydrogen refueling for heavy-duty fuel cell buses and comparison with aggregated real data. *International Journal Hydrogen Energy*. v. 46, n.35, p. 18630 - 18643, 2021

GODOY, G. A. R. Rodovia do hidrogênio Brasil - Paraguai: estudo técnico, econômico e ambiental. 2013. 163 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em:
<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264135>. Acesso em: 7 fev. 2021.

FCH JU, The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots. 2017.

FONTANET, Flávia Aguiar. Avaliação de uma opção de espera de um Parque Eólico pelo Método de Opções Reais. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2012. Disponível em:
https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22813/22813_1.PDF. Acesso em: 7 fev. 2024.

GRÜGER, F.; DYLEWSKI, L.; ROBINIUS, M.; STOLTEN, D. Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. *Applied Energy*, Londres, v. 228, n. July, p. 1540–1549, 2018.

IPCC. Annex VII: Glossary. In: MATTHEWS, J.B.R.; MÖLLER, V.; VAN DIEMEN, R.; FUGLESTVEDT, J.S.; MASSON-DELMOTTE, V.; MÉNDEZ, C.; SEMENOV, S.; REISINGER, A. (Eds.). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. pp. 2215–2256. DOI: 10.1017/9781009157896.022.

IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2019, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

HYDROGEN COUNCIL. Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. 2021. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

FORTALEZA, Prefeitura Municipal. Plano Fortaleza 2040. 8 Volumes. Fortaleza: Iplanfor, 2016.

LAN, X.; TANS, P.; THONING, K.; NOAA Global Monitoring Laboratory. Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements.[S.l.]: NOAA GML, 2023. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>>. Acesso em: 5 jan. 2024.

MICENA, Raul Pereira. Estação de produção e abastecimento de hidrogênio solar: análise técnica e econômica. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.

NEOENERGIA. Você sabe como funciona um aerogerador?, 2021. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-umaerogerador.aspx>. Acesso em: 5 jan. 2024.

OUR WORLD IN DATA. Global atmospheric CO concentration: Atmospheric carbon dioxide (CO) concentration is measured in parts per million (ppm). 2023. Acesso em: 5 jan. 2024.

PAIVA, V. R. C. Monetização dos Benefícios Sociais e Ambientais da Eletrificação das Frotas de Ônibus. 9º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável (PLURIS 2021 DIGITAL). v. 9. n. 1. 2021.

SAUER. Hydrogen Compressors: Dependable up to 500 bar – anywhere, anytime, anygas. 2021. Disponível em: https://www.ynna.cz/obrazkysoubory/sauer_hydrogen_compressors_en-378c4.pdf?redir. Acesso em: 7 fev. 2024.

SEEG. Plataforma SEEG. [S.l.]: SEEG, 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 7 fev. 2024.

SILVA, E. P. da. Introdução À Tecnologia e Economia do Hidrogênio. Unicamp: Campinas, 1991.

SOLARIS. Zero Emissions Powertrains: Product Catalogue 2021/2022. 2021. Disponível em: https://www.solarisbus.com/public/assets/content/pojazdy/2021/2021/EN_Zero_emisyjne_1920_x_1080.pdf. Acesso em 7 fev. 2024.

THYSSENKRUPP. thyssenkrupp expands production capacities for water electrolysis plants. 2023. <<https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/media/press-releases/thyssenkrupp-expands-production-capacities-for-water-electrolysis-plants>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

WISER, R.H. BOLLINGER, M. Wind Technologies Market Report. 2019. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

DECARBONIZATION OF FORTALEZA'S BUS FLEET: Sizing Infrastructure for Green Hydrogen Production via Wind Energy

Author: Hariel Abreu Pereira (Federal Institute of Education, Science, and Technology of Ceará - IFCE)

Co-Authors: João José Moura Vieira (Federal University of Ceará - UFC);
Ana Carolina Miranda Magalhães (Federal University of Ceará - UFC);
William Magalhães Barcellos (Federal University of Ceará - UFC)
Auzuir Ripardo de Alexandria (Federal Institute of Education, Science, and Technology of Ceará - IFCE)

Presentation Supervisor: Hariel Abreu Pereira

ABSTRACT

Extensive reliance on fossil fuels as the primary energy source in the economy since the Second Industrial Revolution has led to a substantial increase in greenhouse gas (GHG) emissions in the atmosphere. This rise in GHG levels, long neglected, has resulted in significant environmental impacts in various regions of the planet, including some particularly vulnerable areas in Brazil. In this context, the importance of Transport Decarbonization is emphasized. This sector, the second-largest polluter of the atmosphere, not only contributes to global climate issues but also generates local problems, especially in major Brazilian cities, such as noise pollution. Therefore, this study proposes sizing Renewable Energy generation infrastructures and Green Hydrogen production aimed at the comprehensive decarbonization of the Urban Public Transport Fleet in the city of Fortaleza, Brazil. This decarbonization action involves replacing traditional vehicles with diesel-powered propulsion systems with Hydrogen Fuel Cell Buses. To meet the demand of the implementation proposal in the municipality of Fortaleza, it is necessary to produce 37,819.32 kg of hydrogen per day. Thus, characterization of production, storage, compression, and refueling subsystems is proposed through sizing and energy, economic, and logistics analyses. Results revealed an annual electricity generation demand of 766.93 GWh to supply consumption of all subsystems covered by this proposal. In this regard, a Wind Farm with a capacity of 840 GWh per year was sized. Finally, the economic evaluation of this proposal indicated a saving of US\$ 359,541,391.20 over the useful life of most equipment and a simple payback of the investment in 13 years.

Keywords: Green Hydrogen; Wind Energy; Decarbonization;; Public Transport.

Explorando o Hidrogênio Verde no Brasil: Uma Análise Abrangente de Políticas, Projetos, Inovações e Regulações

Icoana Laís L. M. Martins¹, Alef Cristini O. da Silva¹, Julia Safranski Soares¹ e Thiago F. da Silva¹

1- H2Todos Educação

e-mail: icoanalais@gmail.com

Apresentadora: Icoana Laís L. M. Martins

Resumo

Na Conferência das Partes das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 2021 (COP26), os países reafirmaram o compromisso de acelerar a transição para fontes de energia sustentáveis, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. O Brasil, com sua expertise em fontes renováveis, está liderando esse movimento, aproveitando suas condições geográficas e climáticas favoráveis. Nesse cenário dinâmico, o hidrogênio verde (H2V), produzido através da eletrólise da água, utilizando-se energia proveniente de fontes renováveis, surge como uma solução promissora para o futuro da energia. Este artigo aborda o cenário do hidrogênio verde no Brasil, desde políticas públicas até projetos em andamento, inovações tecnológicas e regras que moldam essa indústria. O hidrogênio verde surge como uma alternativa para substituir os combustíveis fósseis, alinhando-se com as metas de descarbonização. O Brasil, se apresenta como um forte candidato a se tornar um dos maiores exportadores de hidrogênio do mundo por estar localizado em uma região geográfica favorável para a geração de energia, solar e eólica, que podem produzir o hidrogênio verde por meio da eletrólise da água. Desempenhando um papel fundamental na transição global para uma matriz energética mais sustentável. Nosso objetivo foi compreender as perspectivas para o desenvolvimento da indústria, comércio e investimentos, considerando o papel do país na transição energética global. Realizamos uma revisão do histórico, políticas públicas, panorama da indústria, projetos e pesquisa em desenvolvimento relacionadas ao hidrogênio verde no Brasil. Apesar dos desafios, como a necessidade de aprimorar a estrutura regulatória, o país está bem-posicionado para moldar positivamente o futuro do hidrogênio verde. O desenvolvimento contínuo dessa indústria não apenas impulsionará a economia brasileira, mas também irá gerar novos empregos e atrair novos investimentos para o país. O Brasil, com sua visão e compromisso, está no caminho para se tornar um dos protagonistas na produção e exportação de hidrogênio verde, marcando uma nova era na transição energética global.

Palavra-Chave: hidrogênio; regulação; investimento; política pública

1- Introdução

Na Conferência das Partes das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 2021 (COP26), os países reiteraram seu compromisso em alcançar as metas climáticas e acelerar a transição para fontes de energia de baixa emissão, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Esse compromisso ocorre em meio a mudanças no setor de energia, impulsionadas por uma demanda crescente por energia, e uma maior participação de fontes renováveis na matriz energética.

Nesse cenário, o hidrogênio verde (H2V) surge como uma solução promissora para moldar o futuro da energia, destacando-se como uma das fontes que podem impulsionar a transição energética. Este vetor energético surge como uma oportunidade significativa para a indústria brasileira alcançar a descarbonização, desempenhando um papel estratégico na transição energética, contribuindo para o cumprimento das metas e compromissos estabelecidos nos acordos climáticos.

O aumento do consumo de hidrogênio torna-se importante para impulsionar a transição energética em setores produtivos, como siderurgia e petroquímica, que buscam reduzir as emissões de carbono em seus processos de produção (CASTRO, 2022). Diante do aumento e instabilidade nos custos do gás natural, do petróleo e de seus derivados, espera-se que os governos intensifiquem políticas de desenvolvimento de fontes alternativas. Essas ações podem assegurar a segurança da demanda interna de energia, ao mesmo tempo em que oferecem oportunidades para o Brasil explorar um mercado de exportação. A crise na Ucrânia, ao acelerar a transição energética global, apresenta possibilidades concretas para o Brasil se destacar nesse contexto em evolução.

O Brasil se apresenta como país em potencial para a produção de hidrogênio por possuir uma matriz elétrica com fontes renováveis, como a solar, eólica e hídrica (ANI, 2022). A transição energética será positiva para o Brasil, especialmente no contexto do hidrogênio verde. Acredita-se que o hidrogênio verde se torne a commodity energética que irá gradativamente substituir o gás e o petróleo, em função de três vetores: segurança energética, sustentabilidade e custo.

Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise abrangente sobre o cenário do hidrogênio no Brasil. Com foco nas políticas públicas, nos projetos em curso, nas inovações tecnológicas em andamento, nas principais empresas atuantes e nos aspectos regulatórios que podem contribuir no desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio.

2- Histórico do Hidrogênio no Brasil

No início dos anos 90, o Brasil tem buscado desenvolver projetos e pesquisas voltados para a área do hidrogênio. Em 98, o governo brasileiro estabeleceu o Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) com o propósito de realizar pesquisas sobre células de combustível, visando substituir os motores a combustão (FAPESP, 2001). Entretanto, nos primeiros anos da década de 2000, as pesquisas na área de hidrogênio enfrentaram desafios devido à limitação de conhecimento por parte dos profissionais envolvidos e aos custos elevados dos equipamentos necessários para o desenvolvimento dessa tecnologia.

A célula a combustível brasileira, Figura 1, foi desenvolvida em 2004, marcando um feito inédito no país. Com uma capacidade de 30 kW (quilowatts) de energia elétrica, a tecnologia demonstrou ser suficiente para alimentar um prédio comercial de três andares. Essa inovação converte energia química em energia elétrica por meio de reações de oxidação-redução do combustível, utilizando o hidrogênio como principal agente (FAPESP, 2003). Em 2005, foi implementado o "Programa de Ciência, Tecnologia e Inovação para a Economia do Hidrogênio" (ProH₂) que tinha como objetivo central o incentivo a ações capazes de impulsionar o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogênio e de sistemas de célula a combustível.(MME, 2021).

Figura 1: Primeira célula a combustível brasileira.



Fonte: FAPESP (2003).

Em 2005, foi apresentado o "Roteiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil", estabelecendo as metas para o período de 20 anos. O documento ressalta a relevância de diversas rotas tecnológicas nas quais o Brasil poderia obter vantagens competitivas, como a transição para o hidrogênio a partir do gás natural (PNH, 2021).

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) publicou, em 2010, o documento "Hidrogênio Energético no Brasil: Subsídios para Políticas de Competitividade: 2010-2025", apresentando recomendações para impulsionar a economia do hidrogênio. O relatório propôs a colaboração entre ministérios, órgãos governamentais e instituições de pesquisa para a implementação de ações a curto, médio e longo prazo (PNH,2021). Nesse contexto, o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCTI) direcionou investimentos em pesquisa por meio de bolsas, incentivando o avanço tecnológico na eletrólise da água e em células a combustível (CGEE, 2010).

Em 2017, surgiu a Associação Brasileira de Hidrogênio (ABH2), uma iniciativa que visa melhor organizar as ações e recursos, tanto públicos quanto privados. Já em 2018, o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Energias Renováveis e Biocombustíveis ressaltou que o aproveitamento de energias renováveis no Brasil apresenta uma oportunidade significativa para a produção de hidrogênio por meio da eletrólise, especialmente em períodos de excedente de eletricidade proveniente de fontes intermitentes. Essa abordagem permite o eficiente armazenamento de energia por longos intervalos, sendo aplicável em mobilidade e geração distribuída de energia.

Em 2020, o Plano Nacional de Energia 2050 identificou o hidrogênio como uma tecnologia disruptiva e de interesse estratégico no contexto da descarbonização da matriz energética. Essa identificação resultou em diversas recomendações para a política energética, abrangendo aspectos como a estrutura legal e regulatória, visando incentivar a adoção de tecnologias aplicáveis à cadeia do hidrogênio (PNE,2050).

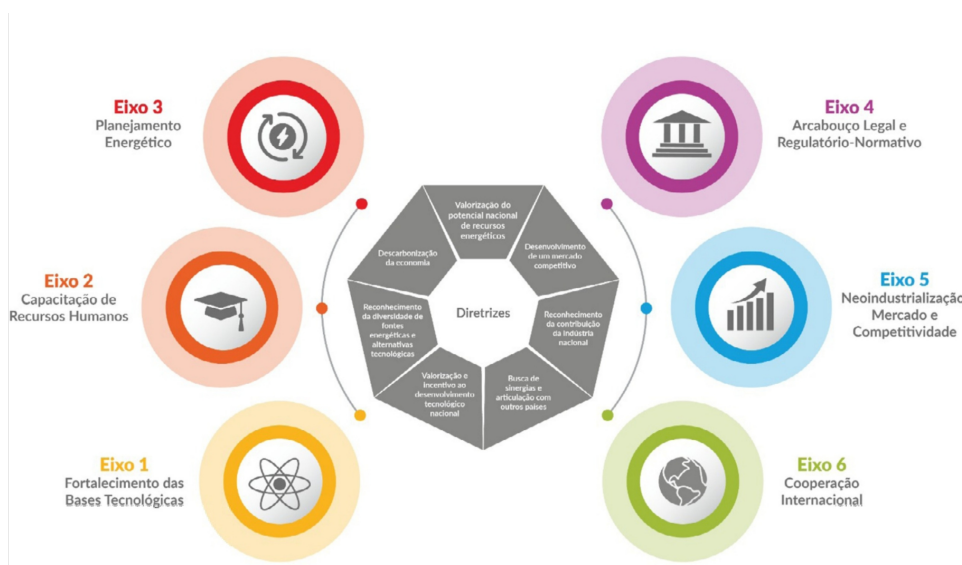
Em 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou as "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira para o Hidrogênio", abordando o panorama de mercado, rotas tecnológicas, custos, desafios, o papel do hidrogênio na transição energética e, por fim, as implicações para políticas públicas. No mesmo ano, foram divulgadas as Propostas para Diretrizes do Programa Nacional de Hidrogênio no Brasil (PNH, 2021).

A estruturação dessas diretrizes é apresentada na Figura 2, as quais devem igualmente contemplar medidas para fomentar a comunicação entre a sociedade e os stakeholders envolvidos no âmbito do hidrogênio. No primeiro eixo, pretende-se realizar o mapeamento e o fortalecimento das competências no país para impulsionar o desenvolvimento da economia do H₂, concentrando-se no aprimoramento da base científico-tecnológica. O segundo eixo concentra-se no desenvolvimento de recursos humanos nacionais capacitados para o planejamento, licenciamento e operação de projetos relacionados à produção, transporte, armazenamento e utilização do hidrogênio (PNH, 2021).

O terceiro eixo, voltado para o planejamento energético, busca obter vantagens por meio de estudos de oferta e demanda, explorando a expansão do setor elétrico e avaliando os impactos socioambientais. No quarto eixo, busca-se mapear a legislação e regulamentação vigentes no país para fundamentar a inclusão do hidrogênio como vetor energético e combustível na matriz energética brasileira, promovendo a regulamentação por meio de órgãos governamentais (PNH, 2021).

O quinto eixo tem como objetivo mapear grupos nacionais que já atuam com o hidrogênio, visando compreender sua cadeia de valor, desde a geração até o consumo final em diferentes setores. O sexto eixo considera a cooperação internacional como elemento integrante no ciclo tecnológico, desenvolvimento industrial e consolidação da economia do hidrogênio (PNH, 2021).

Figura 2: Eixos do PNH2.



Fonte: PNH2 (2023).

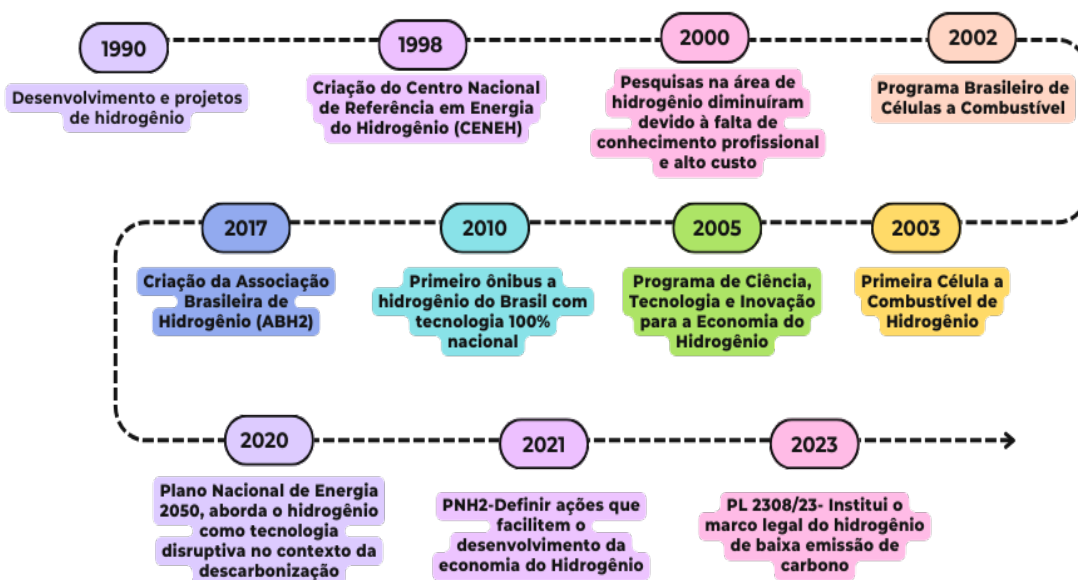
Em março de 2023, foi criada a comissão especial sobre hidrogênio verde pelo Senado Federal, que tem como objetivo principal impulsionar o desenvolvimento de políticas públicas relacionadas a esse combustível. Sua missão envolve não apenas incentivar o crescimento em escala da tecnologia de geração de energia limpa baseada em hidrogênio verde, mas também avaliar e propor políticas públicas que promovam a expansão e adoção dessa tecnologia no contexto nacional. A comissão busca, assim, contribuir para o avanço sustentável e eficaz do setor de hidrogênio verde no Brasil (AGÊNCIA SENADO, 2023).

A comissão especial da Câmara dos Deputados sobre transição energética aprovou, em 28 de novembro de 2023, a proposta de marco legal para produção e uso do hidrogênio (PL 2308/23), reconhecido como o "combustível do futuro" é vital para redução das emissões de gases do efeito estufa.

O relator, o deputado Bacelar (PV-BA), delineou princípios, objetivos, taxonomia, governança, certificação e incentivos fiscais e financeiros. Destaca-se a criação da Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono, com flexibilidade para desenvolvimento de todas as rotas de produção, sem categorização por cores. A governança será da responsabilidade da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Bacelar propõe ainda o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio, voluntário para os produtores, visando promover a utilização sustentável do produto (CÂMARA NOTÍCIAS, 2023).

A Figura 3 exibe a cronologia do desenvolvimento do hidrogênio no Brasil. Ao longo dos anos, o país tem destinado investimentos a projetos e iniciativas com o objetivo de impulsionar a produção e aplicação deste vetor energético, alinhando-se à descarbonização e contribuindo para alcançar metas ambientais.

Figura 3: Cronologia do Hidrogênio no Brasil.



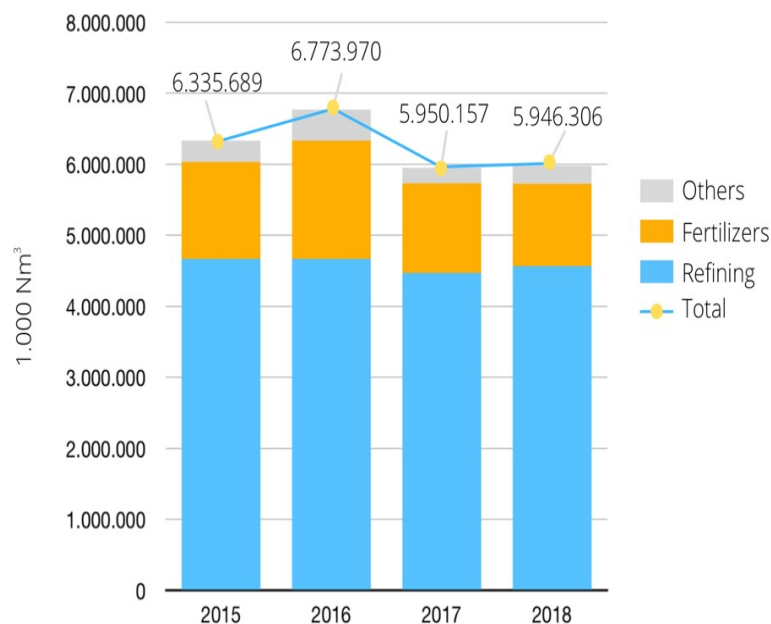
Fonte: H2Todos (2024).

3- Panorama da Indústria de Hidrogênio no Brasil

O Brasil destaca-se por ter uma matriz elétrica diversificada, com ênfase em fontes renováveis. A expressiva presença dessas fontes decorre não apenas da abundância natural desses recursos, mas também do aprimoramento da estrutura institucional ao longo dos anos (GERMAN-BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP, 2021). O crescimento dos investimentos em energia eólica e solar, será motivado pela crescente incerteza e custos associados ao gás e ao petróleo (CASTRO, 2022).

A Figura 4 exibe os dados totais de produção de hidrogênio no Brasil nos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. É observado que a Petrobras é responsável por aproximadamente 95% da produção total do país, especialmente nas categorias "refino" e "fertilizantes". Vale ressaltar que a Petrobras atua como autoprodutora, significando que sua produção de hidrogênio se destina ao consumo interno para uso nos processos de produção de outros derivados do petróleo. Portanto, esse hidrogênio não circula na cadeia de valor do setor no Brasil. Não há informações disponíveis sobre a presença de atividades da indústria merchant, isto é, fornecedora de gás hidrogênio on-site ou off-site para refinarias no Brasil, prática comum nos Estados Unidos (German-Brazilian Energy Partnership, 2021).

Figura 4: Produção Anual de H2 no Brasil (1000Nm³).



Fonte: German-Brazilian Energy Partnership (2021).

3.1- Localização das Indústrias de Hidrogênio no Brasil

Alguns governos estaduais, em colaboração com complexos industriais e empresas do setor de energia, têm iniciado o desenvolvimento de projetos de Hub de Hidrogênio Verde, visando abranger modelos de negócios em toda a cadeia produtiva do hidrogênio, desde a produção, armazenamento e utilização até a distribuição (ANI, 2022). As primeiras instalações para a produção de hidrogênio verde serão localizadas em portos oceânicos, onde existem parques industriais, conhecidos como "vales de hidrogênio verde" (CASTRO, 2022).

No Brasil, a região Nordeste se destaca como o epicentro das atividades relacionadas ao H2V, impulsionada pelo potencial solar e eólico característico dessa área, aliado à proximidade geográfica com a Europa e os Estados Unidos, o que poderia favorecer as exportações no futuro (TOSI, 2022). Algumas das iniciativas pioneiras incluem o Porto de Pecém- CE, o de Suape- PE, e o Porto do Açu- RJ. Atualmente, destaca-se também um importante projeto no Porto de Aratu, associado ao significativo Pólo Industrial de Camaçari.

4- Pesquisa e Desenvolvimento de Projetos de Hidrogênio Verde

4.1- Projeto de ônibus com Célula a Combustível para transporte urbano no Brasil

O Laboratório de Hidrogênio (LabH2) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) tem conduzido pesquisas na área de hidrogênio desde 2005. Em 2010, alcançou um

marco ao desenvolver o protótipo do primeiro ônibus híbrido da América Latina. Esse ônibus é impulsionado por uma combinação de hidrogênio e eletricidade, possui capacidade para 69 passageiros e uma autonomia de 300 km.

Durante o 3º Congresso Brasileiro de Hidrogênio, que foi realizado em Maricá no Rio de Janeiro, o protótipo do ônibus movido a hidrogênio (Figura 5), esteve em exibição no evento para que os participantes pudessem conhecer a tecnologia. A Prefeitura de Maricá e a Coppe /Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) fizeram uma parceria para o estudo da tecnologia que faz parte dos planos do município para descarbonizar totalmente a frota de coletivos da cidade até 2038.

Figura 5- Ônibus híbrido movido a hidrogênio e eletricidade desenvolvido pela COPPE-UFRJ.



Fonte: Arquivo Pessoal (2023).

A COPPE-UFRJ, em parceria com empresas do Rio de Janeiro, estabeleceu uma colaboração para a fabricação e comercialização em escala pré-industrial desse inovador ônibus movido a hidrogênio e eletricidade. O principal objetivo dessa iniciativa é contribuir para a redução das emissões de dióxido de carbono no Brasil. O desenvolvimento e a fabricação desse veículo resultaram de uma colaboração entre diversas empresas, incluindo AES Eletropaulo, Ballard Power Systems, Epri, Hydrogenics, Marcopolo, Nucellys, Petrobras Distribuidora e Tuttotrasporti. Esse veículo opera com base em energia elétrica, complementada pela energia gerada por uma célula de combustível movida a hidrogênio. Além disso, destaca-se por sua eficiência energética superior em comparação com os ônibus convencionais a diesel (FINEP, 2012).

4.2- Projeto Planta Piloto de Hidrogênio na UHE Itaipu Binacional

O Núcleo de Pesquisa em Hidrogênio (NUPHI), Figura 6, foi estabelecido através de uma parceria entre a Usina Hidrelétrica de Itaipu, o Parque Tecnológico Itaipu (PTI) e a Eletrobrás, com o apoio do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH) da Unicamp, para criar a primeira planta de hidrogênio no Paraná-BR. A planta tem como objetivo analisar o ciclo de vida do hidrogênio, abrangendo as fases de produção, purificação, compressão, armazenamento, controle de qualidade, transporte e uso final. O PTI também é um dos fundadores da Associação Brasileira de Hidrogênio (PTI, 2018).

Figura 6- Planta Piloto de Hidrogênio na UHE Itaipu Binacional.



Fonte: [https://blog.pti.org.br/pti-br-missao-estrategica-hidrogenio-verde/\(2024\)](https://blog.pti.org.br/pti-br-missao-estrategica-hidrogenio-verde/(2024)).

A Usina Hidrelétrica de Itaipu iniciou as operações de sua planta experimental de hidrogênio no final de 2014, buscando aproveitar o excesso de água do reservatório para gerar energia e abastecer uma grande instalação de produção de hidrogênio. O modelo implementado em Itaipu pode ser replicado em outras Usinas Hidrelétricas no Brasil, contribuindo para disseminar modelos de negócios de hidrogênio verde no país.

A planta conta com uma célula a combustível de 6 kW, que demonstrou em testes fornecer energia para o sistema de iluminação PPH, composto por 21 luminárias com consumo de 70 W cada e potência total de 1.470 W. O projeto inclui ainda o armazenamento do

hidrogênio sustentável em cilindros e sua utilização em células a combustível para aplicações estacionárias e veiculares na frota de veículos elétricos da Itaipu, através do Programa de Veículos Elétricos da organização (GERMAN-BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP, 2021).

4.3- Projeto Hidrogênio de FURNAS Centrais Elétricas S/A. Usina de Itumbiara

Em 2021, a Eletrobrás inaugurou uma planta de estudos para geração de hidrogênio verde nas instalações da Usina Hidrelétrica de Itumbiara, localizada entre Minas Gerais e Goiás. O propósito do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento é testar o armazenamento de energias sazonais ou intermitentes e sua integração no Sistema Interligado Nacional (SIN). Os testes realizados em Itumbiara abrangem avaliações da tecnologia do eletrolisador, custos de manutenção, durabilidade do equipamento, perda de eficiência devido ao desgaste do sistema, qualidade da energia armazenada e tempo de resposta durante a inserção no Sistema Interligado Nacional, entre outros aspectos. Essas análises fornecem informações importantes para o desenvolvimento de grandes projetos (Eletrobras, 2021).

Figura 7- Planta Piloto de Hidrogênio na Usina de Itumbiara.



Fonte: <https://tratamentodeagua.com.br/furnas-inaugura-planta-testes-producao-hidrogenio-verde/2024>).

O projeto está alinhado com a resolução 21/2016 da Agência Nacional de Energia Elétrica, concentrando-se em "arranjos técnicos e comerciais para a inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro, com um investimento previsto de aproximadamente R\$ 44,6 milhões até 2021" (GIZ, 2021,). Essa iniciativa é desenvolvida em

parceria com a Universidade de Brandemburgo (Alemanha), que possui expertise em armazenamento de hidrogênio.

4.4- Outros Projetos de Hidrogênio no País

Outro empreendimento relevante é a planta de Armazenamento de Energia da Companhia Energética de São Paulo (CESP), iniciada em 2017. A Companhia Paulista de Transmissão de Energia Elétrica tem implementado projetos de sistemas de armazenamento de energia na usina hidrelétrica Engenheiro Sérgio Motta. Situada às margens do Rio Paraná, na divisa entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, o projeto engloba "um dispositivo de eletrolisador de água com 107 kW, com capacidade de produção de hidrogênio de 20 Nm³/h, dois tanques pressurizados para armazenamento de hidrogênio com capacidade de 600 m³, equivalente a 54 kg de armazenamento" (GIZ, 2021).

Destaca-se também o projeto Bio-Hydrogen ERGOSTECH Renewable Energy Solutions, que recebeu uma contribuição da Petrobras em 2010 para o desenvolvimento de soluções em processos para a produção de bio-hidrogênio a partir de resíduos orgânicos e efluentes agroindustriais. Esse projeto representa a única planta no mundo para a produção de bio-hidrogênio por meio de processo de fermentação anaeróbica, contando com uma avançada estrutura laboratorial para dar suporte às atividades de pesquisa em desenvolvimento. O foco está na busca por melhorias nos processos e na produtividade para a produção de hidrogênio, biogás e outros produtos a partir de resíduos agroindustriais (GERMAN-BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP, 2021).

No Nordeste do Brasil, a movimentação em torno do H2V ganha destaque, impulsionada pelo potencial solar e eólico da região, além da proximidade com a Europa e os Estados Unidos, favorecendo possíveis exportações futuras (TOSI, 2022). Projetos pioneiros estão sendo desenvolvidos no Porto de Pecém, no Ceará, o projeto de exportação de hidrogênio verde, é uma colaboração do governo estadual, a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC), a Universidade Federal do Ceará (UFC) e o complexo portuário do Pecém, pois visa estabelecer um hub de hidrogênio (GERMAN-BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP, 2021).

5- Conclusão

O expressivo crescimento do hidrogênio no cenário internacional e nacional traz consigo consequências significativas, acompanhadas por novos desafios geopolíticos para o país. Em decorrência das transformações na geopolítica energética global após a crise da Ucrânia, observa-se uma aceleração no processo de transição energética, impactando também o mercado de hidrogênio. Nesse contexto, o Brasil ganha destaque na ordem internacional devido ao seu considerável potencial para o desenvolvimento dessa fonte.

Conforme discutido ao longo deste artigo, o Brasil vem promovendo o uso de fontes renováveis desde o início dos anos 2000. Se espera que um processo semelhante ocorra no caso do hidrogênio verde, com políticas concretas de atração de investimentos e uma estrutura regulatória clara.

A elaboração de um plano de ação nacional deve abranger aspectos abrangentes visando mitigar os impactos adversos por meio de regulamentações. Prioridade deve ser dada à geração de empregos altamente qualificados em um setor de alta tecnologia, promovendo, assim, a transferência de conhecimento para evitar a dependência exclusiva de equipamentos e técnicas importados.

Referências

AGÊNCIA SENADO. **Comissão do Hidrogênio Verde debate investimentos no setor.** Acesso dia 3 de fevereiro de 2024. Disponível em:<<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/06/06/comissao-do-hidrogenio-verde-debate-investimentos-no-setor>>

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DA INDÚSTRIA (ANI). **CNI aponta caminhos para Brasil adotar hidrogênio sustentável como nova fronteira energética.** 15 August de 2022. Available on: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/cni-aponta-caminhos-para-brasil-adotar-hidrogenio-sustentavel-como-nova-fronteira-energetica/>>.

CÂMARA NOTÍCIAS, **Comissão aprova proposta de marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono.** Acesso em: 3 de fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/1020523-comissao-aprova-proposta-de-marco-legal-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono/>>

CASTRO, Nivalde. **Crise na Ucrânia e a indústria nascente do hidrogênio verde no Brasil.** BroadCast Energia: 2022. Available on: < <https://energia.aebroadcast.com.br/tabs/analysis> >

CASTRO, Nivalde; ELIZÁRIO, Sayonara; BOTELHO, Vinicius; CASTRO, Bianca. **Observatório de Hidrogênio N 7.** Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ): Rio de Janeiro, 2022.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade,2010-2025; Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários.** CGEE: Brasília, 2010. 72p. Available on: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.5>.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GIZ. **Mapeamento do setor de hidrogênio Brasileiro. Panorama actual e potenciais para hidrogênio verde.** 2021. Available on:

<https://www.energypartnership.com.br/fileadmin/user_upload/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2h.pdf>.

ELETOBRAS. **Planta de geração de hidrogênio verde é inaugurada por FURNAS em Itumbiara.** Itumbiara: 08 October 2021. Available on: <<https://www.furnas.com.br/noticia/103/noticias/1759/planta-de-geracao-de-hidrogenio-verde-e-inaugurada-por-furna>>.

FAPESP. Centro de Referência para o Hidrogênio. **Revista Pesquisa FAPESP:** São Paulo, 2001. Edição 63, p. 48-49. Available On: < https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2001/04/48_linha-de-produção2.pdf >.

FINEP. **Ônibus a hidrogênio.** Finep Inovação e Pesquisa - Empresa Pública do MCTI, 2012. Available on: <<http://www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui-tem-finep/onibus-a-hidrogenio>>.

GERMAN-BRAZILIAN ENERGY PARTNERSHIP. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde.** German-Brazilian Energy Partnership: Rio de Janeiro, October 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) (2021). **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).** Brasília, 2021. 24p. Available on: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrognoRelatriodiretrizes.pdf>>.

PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU (PTI). **Hidrogênio: PTI reforça atuação e participa do maior evento global sobre o tema.** Foz do Iguaçu-PR. 31 October 2018. Available on: <<https://webradioagua.pti.org.br/2018/10/31/hidrogenio-pti-reforca-atuacao-e-participa-do-maior-evento-global-sobre-o-tema/>>.

Exploring Green Hydrogen in Brazil: A Comprehensive Analysis of Policies, Projects, Innovations and Regulations

Icoana Laís L. M. Martins¹, Alef Cristini O. da Silva¹, Julia Safranski¹ e Thiago F. da Silva¹

1- H2Todos Educação

e-mail: icoanalais@gmail.com

Apresentadora: Icoana Laís L. M. Martins

Abstract

At the United Nations Conference of the Parties on Climate Change in 2021 (COP26), countries reaffirmed their commitment to accelerating the transition to sustainable energy sources, reducing dependence on fossil fuels. Brazil, with its expertise in renewable sources, is leading this movement, taking advantage of its favorable geographical and climatic conditions. In this dynamic scenario, green hydrogen (H₂V), produced through the electrolysis of water using energy from renewable sources, is emerging as a promising solution for the future of energy. This article looks at the green hydrogen scenario in Brazil, from public policies to ongoing projects, technological innovations and the rules that shape this industry. Green hydrogen is emerging as an alternative to replace fossil fuels, in line with decarbonization targets. Brazil is a strong candidate to become one of the world's largest hydrogen exporters, as it is in a favorable geographical region for solar and wind power generation, which can produce green hydrogen through the electrolysis of water. It plays a key role in the global transition to a more sustainable energy matrix. Our aim was to understand the prospects for the development of industry, trade, and investment, considering the country's role in the global energy transition. We reviewed the history, public policies, industry panorama, projects and research under development related to green hydrogen in Brazil. Despite the challenges, such as the need to improve the regulatory framework, the country is well placed to positively shape the future of green hydrogen. The continued development of this industry will not only boost the Brazilian economy but will also generate new jobs and attract new investments to the country. Brazil, with its vision and commitment, is on the path to becoming a leading player in the production and export of green hydrogen, marking a new era in the global energy transition.

Keyword: hydrogen; regulation; investment; public policy.

LEVANTAMENTO DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO DE UM QUEIMADOR INDUSTRIAL UTILIZANDO ÓLEO DIESEL S-10 E SUA MISTURA COM HIDROGÊNIO

MATHEUS HENRIQUE CASTANHA CAVALCANTI^{1,2}, BRUNO AUGUSTO CABRAL ROQUE^{1,2}, JULIANO RODRIGUES PAPPALARDO², LUCIANO TAVARES BARBOSA², PEDRO PINTO FERREIRA BRASILEIRO², DIEGO DE MOURA REBOUCAS³, CELMY MARIA BEZERRA DE MENEZES BARBOSA¹, LEONIE ASFORA SARUBBO²

¹ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Av. dos Economistas s/n, Recife, CEP 50740-590, Brasil

² Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação, Rua Potyra 31, Recife, CEP 50751-310, Brasil

³ Edp Termoelétricas, 40,5KM - Anacetaba, São Gonçalo do Amarante - Ceará, CEP 62670-000, Brasil

E-mail para contato: castanha6499@gmail.com

RESUMO - O uso extensivo de combustíveis fósseis é um dos principais responsáveis pelo agravamento significativo da poluição ambiental, mudanças climáticas e da crise energética. O hidrogênio é considerado um componente essencial na transição energética e para uma economia global de baixo carbono, visando alcançar as metas de emissão líquida zero (Net Zero Emissions) de gases de efeito estufa (GEEs). Sua combustão é livre de carbono, sua reação química altamente exotérmica tem como produto apenas água (H₂O). Em comparação com os combustíveis fósseis, o uso de hidrogênio em motores de combustão interna, como queimadores, pode melhorar a eficiência térmica, ao mesmo tempo que reduz as emissões de carbono. Diante da busca por uma transição energética eficiente, para reduzir o consumo de óleo diesel na geração de energia elétrica pelas indústrias, estão sendo estudadas fontes de energias alternativas que possam suprir a demanda de energia global de forma eficaz, rentável e

operacional. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar o levantamento da eficiência de combustão de um motor de combustão interna à diesel (queimador) e realizar a mistura deste óleo com hidrogênio para constatar a possível melhoria da eficiência térmica do processo e da redução de gases do efeito estufa gerados pela reação química. Para obtenção destes dados foi construído o laboratório de processos termoquímicos, localizado no IATI - Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação, localizado no bairro do Prado, Recife, Pernambuco. O laboratório consta com um queimador industrial, uma fornalha cilíndrica horizontal e uma chaminé para a exaustão dos gases de combustão, os equipamentos estão interligados com a linha de ar comprimido, óleo diesel, hidrogênio e gás liquefeito de petróleo (GLP) e conectados eletricamente com um controlador lógico programável (CLP). A eficiência térmica da combustão foi obtida através do balanço energético do sistema. Uma eficiência média de combustão do óleo diesel de $86\% \pm 8,98$ e de $88,3\%$ para a mistura óleo diesel- H_2 foram calculadas. Os gases de exaustão da queima do óleo diesel foram analisados e valores médios de emissões foram obtidos através do analisador de gases, dentre os gases analisados foram registradas as concentrações médias de $13,86 \times 10^6$ ppm de CO_2 , 68,38 ppm de NO_x e 7,86 ppm de SO_x , principais causadores do efeito estufa e chuva ácida. Não houve concentrações significativas de C_xH_y detectadas pelo equipamento. De acordo com a literatura, o hidrogênio melhora o processo de combustão devido a facilidade de queima, alto limite de inflamabilidade, poder calorífico e tamanho de chama quando comparado a combustíveis derivados de petróleo. Também é capaz de aumentar a eficiência térmica da reação. A utilização em blends com gasolina e diesel têm sido reportados e resultados positivos de ganho de performance, aumento de tempo de vida útil dos equipamentos e redução de emissões de GEEs têm sido explicitados.

Palavras-chave: hidrogênio, combustão, eficiência térmica, queimador, transição energética.

Survey of Combustion Efficiency of an Industrial Burner Using S-10 Diesel and Its Mixture with Hydrogen

Abstract - The extensive use of fossil fuels is one of the main contributors to significant environmental pollution, climate change, and the energy crisis. Hydrogen is considered an essential component in the energy transition towards a low-carbon global economy, aiming to achieve net zero greenhouse gas (GHG) emissions goals. Its combustion is carbon-free, and its highly exothermic chemical reaction produces only water (H₂O). Compared to fossil fuels, the use of hydrogen in internal combustion engines, such as burners, can improve thermal efficiency while reducing carbon emissions. In the search for an efficient energy transition to reduce diesel oil consumption in the electricity generation by industries, alternative energy sources that can effectively, economically, and operationally meet the global energy demand are being studied. Therefore, the aim of this work is to survey the combustion efficiency of a diesel internal combustion engine (burner) and to mix this oil with hydrogen to ascertain the possible improvement in thermal efficiency of the process and the reduction of greenhouse gases produced by the chemical reaction. To obtain these data, the thermochemical processes laboratory was built, located at the IATI - Advanced Institute of Technology and Innovation, Recife, Pernambuco. The laboratory features an industrial burner, a horizontal cylindrical furnace, and a chimney for the exhaust gases, with equipment interconnected with compressed air, diesel oil, hydrogen, and liquefied petroleum gas (LPG) lines and electrically connected to a programmable logic controller (PLC). The thermal efficiency of combustion was obtained through the energy balance of the system. An average combustion efficiency of 86% ± 8.98 for diesel oil and 88.3% for the diesel-H₂ mixture were calculated. The exhaust gases from diesel combustion were analyzed, and average emission values were obtained through the gas analyzer, among the analyzed gases were registered average concentrations of 13.86 x 10⁶ ppm of CO₂, 68.38 ppm of NO_X, and 7.86 ppm of SO_X, the main causes of the greenhouse effect and acid rain. No significant concentrations of C_xH_y were detected by the equipment. According to the literature, hydrogen improves the combustion process due to its ease of burning, high flammability limit, calorific value, and flame size compared to petroleum-derived fuels. It is also capable of increasing the thermal efficiency of the reaction. The use in blends with gasoline and diesel has been

reported, and positive results in performance gain, increased equipment lifespan, and reduction of GHG emissions have been elucidated.

Keywords: hydrogen, combustion, thermal efficiency, burner, energy transition.

1 Introdução

As emissões globais de gases do efeito estufa atingiram o nível mais elevado da história, apresentando uma ameaça existencial para a humanidade à medida que o aquecimento global continua a agravar-se. Essas alterações climáticas preocupam líderes e decisores políticos em todo o mundo. Esses temas têm sido intensamente discutidos em eventos globais visando acordos para redução de emissões de gases de efeito estufa, como a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP) 21, com o Acordo de Paris, e a COP 26, em que os líderes concordaram com o desenvolvimento de suas economias com base no tecnologias neutras em carbono. Para atingir este ambicioso objetivo, é necessário mudar significativamente o atual sistema energético, dependente de combustíveis fósseis, em direção a fontes de energia renováveis. Neste contexto, o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio é visto como um requisito importante nos sistemas energéticos e um contributo necessário para alcançar as metas climáticas (Zainal et al., 2024; Garlet et al., 2024).

O hidrogênio (H_2) é o elemento mais leve da tabela periódica com número atômico 1. Embora o H_2 seja o elemento mais abundante no universo, não está prontamente disponível na forma pura na Terra, estando predominantemente presente em hidrocarbonetos e água, e na forma pura, existe como um gás inodoro e incolor em temperatura e pressão padrão. É altamente inflamável e tem um poder calorífico superior de 142 MJ/kg. A queima de hidrogênio no ar produz apenas água, fornecendo assim energia limpa e livre de poluentes nocivos como NO_x , CO_2 , fuligem e CO, que são obtidos quando hidrocarbonetos como o metano são queimados com o ar. O hidrogênio foi classificado em várias cores com base em sua fonte (como combustíveis fósseis, água e biomassa) e processo de produção, que pode ser usando vários métodos, os mais comuns incluem reforma a vapor de metano (SMR), gaseificação

de carvão, rotas de conversão de biomassa e eletrólise de água (Mokheimer et al., 2024; Agrawal et al., 2024; Chelvam et al., 2024; Alamiery, 2024).

O hidrogênio é cada vez mais reconhecido como um elemento crucial na formação do futuro panorama energético e na promoção do desenvolvimento sustentável para o planeta, e também, é um dos pilares da transição energética, uma vez que pode ser usado tanto como transportador de energia quanto como matéria-prima. O *Hydrogen Council*, um grupo industrial global, acredita que até 2050, o H₂ fornecerá 18% da energia do usuário final, eliminará cerca de 6 Gt de emissões de carbono, permitirá 2,5 trilhões de dólares em vendas e criará 30 milhões de empregos em todo o mundo. Uma economia baseada no hidrogênio é vital para descarbonizar indústrias difíceis de reduzir e promover uma sociedade sustentável (Hassan et al., 2024; Harichandan; Kar; Rai, 2023).

O H₂ pode ser utilizado como combustível alternativo para motores de combustão interna tradicionais devido às suas características de carbono zero e renovável. Motores de combustão interna neutros em carbono são considerados a direção de desenvolvimento futuro do campo de motores. A regeneração limpa e contínua e o bom desempenho da combustão do hidrogênio, apresenta um grande potencial para substituir os combustíveis fósseis tradicionais para a sua utilização em motores de combustão interna. Adicionar gás hidrogênio à combustão de um motor diesel pode melhorar o processo de combustão e aumentar o desempenho do motor, além disso, certos hidrocarbonetos nocivos emitidos pelos motores diesel com a adição de hidrogênio podem ser reduzidos consideravelmente (Huang et al., 2024; Jayaprabakar et al., 2024; Winangun et al., 2023).

A combustão é o processo mais crítico na avaliação do desempenho do motor, e, portanto, melhorar o processo de combustão levaria à eficiência do combustível, juntamente com menores custos de manutenção, operação e instalação. A combustão do hidrogênio tem uma velocidade de propagação de chama muito rápida. Devido à sua rápida velocidade de combustão, a combustão isovolumétrica pode ser melhorada, o que é benéfico para melhorar a eficiência da combustão. O maior poder calorífico é uma vantagem do hidrogênio e o seu menor poder calorífico é 2,5 vezes superior ao do diesel. O H₂ pode liberar mais calor durante a combustão, comparado ao diesel, possui também alto coeficiente de difusão e pode promover a formação de

uma mistura combustível mais uniforme no cilindro após entrar nele, além disso, o produto da combustão é apenas água (Malik et al., 2024; Li et al., 2023).

Diante da busca por uma transição energética eficiente, para reduzir o consumo de óleo diesel na geração de energia elétrica pelas indústrias, estão sendo estudadas fontes de energias alternativas que possam suprir a demanda de energia global de forma eficaz, rentável e operacional. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar o levantamento da eficiência de combustão de um motor de combustão interna à diesel (queimador) e realizar a mistura deste óleo com hidrogênio para constatar a possível melhoria da eficiência térmica do processo e da redução de gases do efeito estufa gerados pela reação química. Todos os experimentos com óleo diesel foram realizados fisicamente no laboratório de processos termoquímicos, localizado no IATI - Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação, no bairro do Prado, Recife, Pernambuco.

Além disso, é crucial considerar o contexto operacional ao avaliar os benefícios da melhoria da eficiência de combustão. Em cenários onde a demanda de energia é restrita, a otimização do uso de combustíveis, como o óleo diesel, através da mistura com hidrogênio, pode significar uma redução substancial no consumo de combustíveis fósseis. No entanto, é importante estar ciente do *efeito rebote*, que pode ocorrer quando a eficiência energética leva a um aumento no consumo de energia devido a demandas operacionais ou de mercado. O projeto atual leva em consideração essas dinâmicas, focando em um sistema de demanda restrita onde a eficiência aprimorada não leva a um aumento no consumo de energia, mas sim a uma operação mais limpa e eficiente.

2 Desenvolvimento

2.1 Metodologia

2.1.1 Balanço energético para obtenção do calor real gerado pela queima de óleo diesel

A equação do balanço de energia (Equação 1) é determinada pela igualdade entre toda corrente energética que entra e toda a corrente energética que sai deste sistema. Foram consideradas algumas hipóteses para este cálculo, que são: um

sistema fechado e isotérmico, sem perdas de carga. Foi estabelecido como volume de controle a entrada da fornalha (a partir do bico pulverizador do queimador) até a saída da chaminé, como mostra a Figura 1 abaixo:

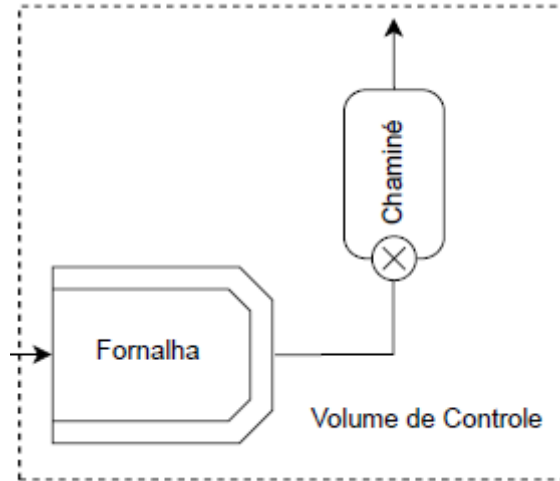


Figura 1 - Volume de controle para o cálculo do balanço de energia.

$$\dot{Q}_{\text{real_diesel}} + \dot{m}_{\text{arp}}c_{p\text{arp}}(T_{\text{arp}} - 298) + \dot{m}_{\text{diesel}}c_{p\text{diesel}}(T_{\text{diesel}} - 298) + \dot{m}_{\text{arc}}c_{p\text{arc}}(T_{\text{arc}} - 298) = \dot{m}_{\text{ex}}c_{p\text{ex}}(T_{\text{ex}} - 298) \quad (1)$$

Onde:

$$\dot{Q}_{\text{real_diesel}} = \text{Vazão do calor real, } \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_i = \text{vazão mássica do componente, } \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$c_{p_i} = \text{calor específico do componente, } \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$T_i = \text{temperatura do componente, K}$$

Nos índices das variáveis, entende-se: arp (ar primário), diesel (óleo diesel), arc (ar comprimido), ex (gases de exaustão). Algumas das variáveis acima foram determinadas de forma indireta através de equações, como é o caso da vazão dos gases da exaustão, que é definida como a soma das vazões de entrada do sistema, estando representada pela Equação 2 ou pela Equação 3.

2.1.1.1 Equação para obtenção da vazão mássica dos gases de exaustão:

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{diesel} + \dot{m}_{arc} \quad (2)$$

Também é possível obter a vazão mássica dos gases de exaustão através da equação da continuidade:

$$\dot{m}_{ex} = \bar{\rho} V \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (3)$$

Onde:

$\bar{\rho}$ = densidade média dos gases de exaustão, $\frac{kg}{m^3}$

D = diâmetro da seção transversal da chaminé, m

V = velocidade, $\frac{m}{s}$

A velocidade, V, termo presente na equação 3, será obtida através da Equação de Bernoulli (Equação 4):

$$\frac{\bar{\rho} V^2}{2} = P_t - P_s = \Delta P \quad (4)$$

Onde:

P_t = pressão total

P_s = pressão estática

As tomadas de pressão serão obtidas pelo medidor de pressão diferencial, mostrado na Figura 4, que está conectado ao tubo de Pitot que foi instalado dentro da chaminé.



Figura 2 - Equipamento medidor de diferença de pressão.

O termo da velocidade é calculado para que possamos determinar a vazão mássica dos gases de exaustão na Equação 3. Além disso, se faz necessário também realizar o cálculo da densidade média dos gases de exaustão, uma vez que a fumaça gerada pela combustão contém uma mistura de gases, como CO, NO_x, SO_x, além dos produtos da reação de oxidação CO₂ e H₂O. A composição e a temperatura dos gases de exaustão são obtidas utilizando o analisador de gases mostrado na Figura 3 (A) e foram determinantes para realização das próximas etapas de cálculo.

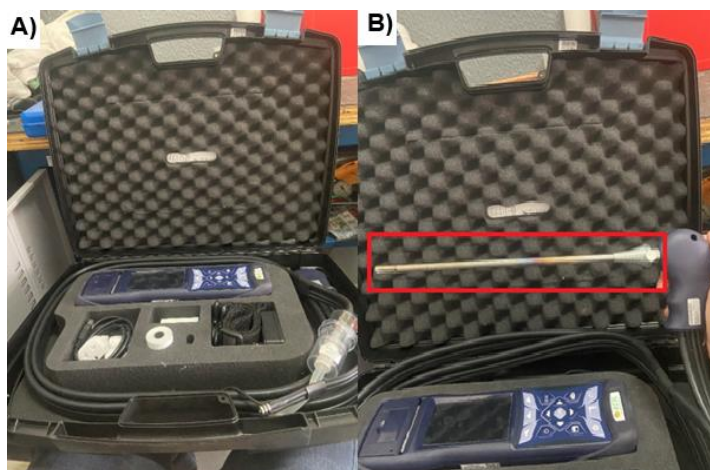


Figura 3 - (A) Analisador de gases, (B) Haste (em vermelho) com a sonda na ponta

O analisador de gases utilizado foi o *Combustion Analyzer Chemist 600* da SEITRON S.p.A, calibrado para realizar a medição dos teores de O₂, CO, NO/NO_x, SO₂, C_xH_y e CO₂IR. Após 10 minutos de queima contínua, a haste Figura 4 (B), foi introduzida no final da seção horizontal da chaminé, próxima ao cotovelo, pouco antes

dos gases seguirem para a seção vertical e serem liberados na atmosfera do ambiente, como mostra a Figura 4.



Figura 4 – Local de inserção da haste do analisador

A análise de alguns gases dá-se após um determinado tempo de contato com os gases de combustão, como mostra a Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Tempos de resposta das células de medição utilizadas no analisador.

Sensor	Nomenclatura do componente	Tempo de resposta (segundos) ¹
O ₂	Oxigênio	20
CO	Monóxido de Carbono	180
NO/NO _x	Óxidos de Nitrogênio	40
SO ₂	Dióxido de Enxofre	50
C _x H _y	Carbono não-queimado	90

O princípio de trabalho do equipamento é da seguinte forma: a amostra de gás é coletada, através da sonda de gás, por uma bomba de sucção de diafragma dentro do instrumento. A sonda de medição possui um cone de posicionamento deslizante que permite que a sonda seja inserida em furos com diâmetro de 11 mm (0,43”) a 16 mm (0,65”) e para ajustar a profundidade de imersão. A amostra de gás é limpa de umidade e impurezas por um coletor de condensado e filtro, posicionado ao longo da mangueira de borracha que conecta a sonda ao analisador. O gás é então analisado em seus componentes por sensores eletroquímicos e infravermelhos, medido,

calculado e mostrado no *display* do equipamento. Estes valores serão utilizados para o cálculo da eficiência de combustão.

2.1.1.2 Equação para obtenção da vazão de calor teórica gerada pela combustão do diesel

O calor teórico é medido utilizando a seguinte equação:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} \times \text{PCI}_{\text{diesel}} = \dot{Q}_{\text{teórico_diesel}} \quad (5)$$

Onde:

$\text{PCI}_{\text{diesel}}$ = Poder Calorífico Inferior do diesel

O calor teórico é a quantidade de energia térmica teórica que pode ser gerada pelo diesel, de forma ideal, onde não há nenhum tipo de perda ou agente externo atuando.

2.1.1.3 Equação da eficiência térmica da combustão para o diesel

$$\eta_{\text{comb}} (\%) = \frac{\dot{Q}_{\text{real_diesel}}}{\dot{Q}_{\text{teórico_diesel}}} \times 100 \quad (6)$$

Esta equação determinará quão eficiente está sendo a queima deste combustível em um cenário não ideal, onde perdas e outros fatores como possíveis perda de carga estão envolvidos.

2.1.1.4 Cálculo da eficiência térmica da mistura diesel-H₂

Analogamente aos cálculos para obtenção da eficiência térmica do diesel, serão os cálculos para a mistura, porém até o presente momento os ensaios experimentais envolvendo a combustão desta combinação de combustíveis encontra-se em execução, neste trabalho será apresentado a eficiência térmica da mistura obtida através da simulação utilizando o *software* comercial de simulação de processos Aspen Plus®, versão 10.0.

O calor teórico da mistura será determinado pela Equação 7:

$$(\dot{m}_{diesel} \times PCI_{diesel}) + (\dot{m}_{H_2} \times PCI_{H_2}) = \dot{Q}_{teórico_mistura} \quad (7)$$

Onde:

$$\dot{m}_{H_2} = \text{Vazão de hidrogênio} \left(\frac{kg}{s} \right)$$

$$PCI_{H_2} = \text{Poder Calorífico do hidrogênio}$$

E a eficiência térmica da combustão será calculada através da Equação 8:

$$n_{comb_m}(\%) = \frac{Q_{teórico_mistura}}{Q_{real_mistura}} \times 100 \quad (8)$$

Foi escolhido o método PSKR (*Predictive Soave-Redlich-Kwong*) para as simulações, que é um método que pode ser utilizado em aplicações envolvendo misturas polares e apolares, prediz interações binárias a qualquer pressão, pode ser utilizado em operações envolvendo hidrocarbonetos e gás hidrogênio. O fluxograma foi montado conforme a Figura 5 abaixo:

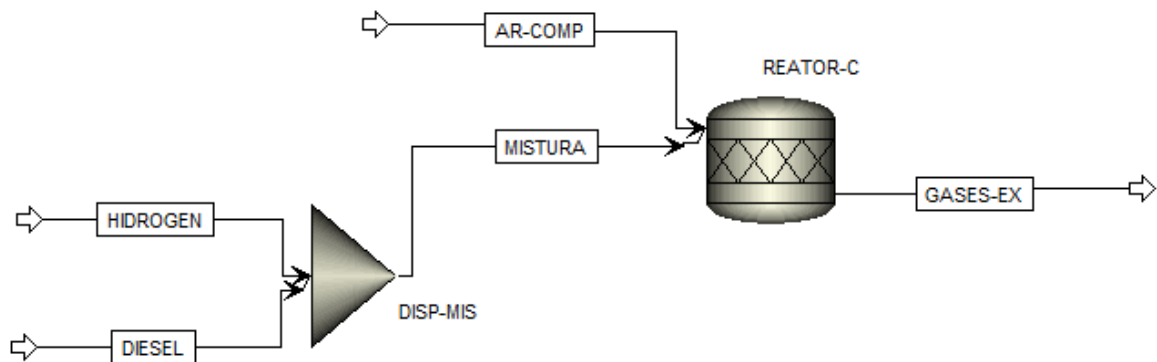


Figura 5 – Fluxograma para a simulação de combustão

O ícone denominado “DISP-MIS” funciona como um misturador para o hidrogênio e o diesel. Ele não exercerá nenhuma outra contribuição além da mistura dos componentes das duas correntes. As propriedades da corrente “MISTURA” serão calculadas pelo simulador, assim como a corrente “GASES-EX”, que é a corrente dos produtos obtidos através da reação de combustão inserida no “REATOR-C. Foi utilizado o RSTOIC, como reator de conversão, já que a cinética de reação é desconhecida e a estequiometria da reação é conhecida. As propriedades das

correntes “AR-COMP” e “DIESEL” serão determinadas utilizando a melhor condição obtida pelos testes do diesel. “HIDROGEN” será 5% da vazão de diesel.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Eficiência térmica da combustão do óleo diesel

Os ensaios de combustão reais foram realizados no laboratório de processos termoquímicos do IATI – Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação. O compilado do valor de cada variável obtida e calculada através das equações acima está descrito abaixo, bem como o valor, já calculado, do calor real gerado por cada corrente do sistema para a combustão do óleo diesel, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Quadro resumo das variáveis de cada corrente do sistema

Variável	Entrada			Saída
	Ar primário	Ar comprimido	Óleo diesel	Gás de exaustão
$\dot{m}_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$	0,4335	0,0025	0,0139	0,4499
$c_{p_i} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right)$	1,0039	1,0051	2,200	1,3240
$\Delta T_i \text{ (K)}$	2,6500	11,1500	7,1500	866,7500
$\dot{Q}_i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right)$	1,1532	0,0280	0,2185	516,2515

Através da Equação 5, foi obtido a vazão de calor teórica do óleo diesel utilizando uma vazão de 0,0139 kg/s:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} \times \text{PCI}_{\text{diesel}} = \dot{Q}_{\text{teórico}_{\text{diesel}}}$$

$$0,0139 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 43200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cong 600 \text{ kW}$$

Utilizando a Equação 1, obtivemos o calor real gerado pela queima do óleo diesel, cujo valor é de aproximadamente 515 kJ/s. A eficiência de combustão do sistema, foi determinada utilizando a Equação 6:

$$\eta_{\text{comb}}(\%) = \frac{\dot{Q}_{\text{teórico_diesel}}}{\dot{Q}_{\text{real}}} \times 100$$

$$\eta_{\text{comb}}(\%) = \frac{515}{600} \cong 86\%$$

Portanto a eficiência de combustão do óleo diesel nas condições operacionais atuais é de aproximadamente 86%. É possível concluir que a carga térmica presente nos hidrocarbonetos do óleo diesel representa praticamente toda a energia produzida pela reação de combustão, sendo ele responsável, majoritariamente pela alta eficiência térmica obtida. Como toda reação de combustão envolvendo hidrocarbonetos, há geração de gases poluentes, a média da concentração de cada componente presente no gás de exaustão oriundo dos ensaios de combustão do óleo diesel foi medida e está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Gases de exaustão oriundos da queima do óleo diesel.

O ₂ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ O (%)	N ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	NO (ppm)	SO ₂ (ppm)
3,91%	13,86%	13,86%	68,38%	7,57	87,57	85,86	7,86

O analisador de gases conseguiu detectar a presença de gases do efeito estufa como o CO₂ e gases causadores da chuva ácida como o SO₂ e o NO_x, além do monóxido de carbono (CO) proveniente da combustão incompleta do diesel e de CO₂ e vapor d'água (H₂O), produtos esperados da reação de oxidação completa. Não foram encontradas concentrações significativas de C_xH_y.

Os níveis de CO gerados pela combustão incompleta são bem menores, em percentual, quando comparado aos níveis de CO₂, oferecendo uma contribuição pequena na totalidade dos gases emitidos juntamente com os demais óxidos (SO₂, NO e NO_x). Isso pode ser explicado devido a regulagem do queimador, que está operando em condições mínimas, oferecendo uma boa proporção de ar/combustível, acarretando em mais reações completas do que incompletas.

2.2.2 Simulação da combustão da mistura diesel-H₂

Na tabela 4, está apresentado os valores de cada corrente inseridos no software para realizar a simulação da combustão da mistura. Estes valores foram escolhidos baseados em uma combustão estequiométrica, com 10% de excesso de ar, a temperatura ambiente. Para cada quilograma de óleo diesel, são requeridos aproximadamente 14,5 quilogramas de ar comprimido.

Tabela 4 – Valores das correntes para a simulação

Variáveis	Ar comprimido	Hidrogênio	Óleo diesel
$\dot{m}_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$	798,00	2,50	50,00
P (bar)	1,00	3,20	2,64
T_i (K)	298,15	303,15	305,15

Os resultados da simulação e carga térmica já calculada estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da simulação para mistura de óleo diesel e H_2

Temperatura do gás (°C)	Vazão (kg/s)	Cp mistura (kJ/kg°K)	Carga térmica (kW)
1927,868	0,236	1,471	661,600

Dessa forma, podemos calcular a eficiência de combustão para a mistura através da Equação 7.

$$(\dot{m}_{diesel} \times PCI_{diesel}) + (\dot{m}_{H_2} \times PCI_{H_2}) = \dot{Q}_{teórico_mistura}$$

$$\left(0,0139 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 43200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,000695 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 120131,008 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cong 684 \text{ kW}$$

A eficiência de combustão do sistema, foi determinada utilizando a Equação 8:

$$n_{comb_m}(\%) = \frac{Q_{mistura} Q_{teórico_mistura}}{Q_{teórico_mistura}} \times 100$$

$$n_{comb_m}(\%) = \frac{604}{684} \cong 88,3 \text{ kW}$$

Podemos observar que comparada com a eficiência térmica da queima do óleo diesel, a sua mistura com apenas 5% de hidrogênio em relação a sua vazão proporciona um aumento de 2% na eficiência de combustão de acordo com a simulação. É necessário também observarmos a Tabela 6, que revela os níveis de concentração de gases poluentes na atmosfera oriundos da queima da mistura dos combustíveis.

Tabela 6 – Resultados da simulação para mistura de óleo diesel e H₂

O ₂ (%)	N ₂ (%)	ÁGUA (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	CxHy
2,1457	73,3235	13,8414	0,2723	10,2885	0,1286

Nota-se que com a contribuição do hidrogênio na reação de combustão, os níveis de dióxido de carbono (CO₂), foram reduzidos em aproximadamente 26%. Isso significa que mais de ¼ das emissões de CO₂ poderiam ser evitadas de serem lançadas ao meio ambiente se apenas 5% da queima dos combustíveis de hidrocarbonetos fossem misturadas com gás hidrogênio.

3 Conclusão

Diante dos resultados experimentais obtidos através dos testes físicos de combustão e dos resultados da simulação da combustão da mistura do óleo diesel com o gás hidrogênio no Aspen Plus®, foi possível constatar que a queima do gás hidrogênio associada a um combustível derivado de petróleo, é capaz de melhorar a performance da combustão, aumentando a eficiência da queima. Além disso, foi observada a redução de cerca de ¼ das emissões de CO₂ na atmosfera caso o hidrogênio fosse misturado ao diesel. Estes resultados representam a possível redução da utilização de combustíveis fósseis para produção de energia, diminuindo

a dependência desses petroderivados nos processos químicos e também elucidam a redução dos danos causados pelo efeito estufa revelando ser uma forte contribuição para as novas estratégias de mitigação das emissões dos gases do efeito estufa (*Greenhouse gases* – GHG), cumprindo as diretrizes do Acordo de Paris e avançando com as metas para alcançar as emissões líquidas zero (*Net Zero Emissions* – NZE) até 2050.

4 Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL-PD-07267-0022/2021) e EDP-Pecém, no âmbito do projeto “Desenvolvimento de Roadmap e Projeto Piloto de H2 no Complexo do Pecém”. Este trabalho também contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq), Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado do Pernambuco (FACEPE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ao Programa de Recursos Humanos (PRH) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), especialmente ao PRH30.1 pelo suporte financeiro e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Brasil.

5 Nota Explicativa

¹ Tempo fornecido pelo manual do fabricante. Estima-se esse tempo para 90% do valor medido.

6 Referências

AGRAWAL D.; MAHAJAN N.; SINGH S. A.; SREEDHAR I. Green hydrogen production pathways for sustainable future with net zero emissions. *Fuel*, v. 359, p. 130131, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130131>.

ALAMIERY, A. Advancements in materials for hydrogen production: A review of cutting-edge technologies. *ChemPhysMater*, v. 3 (1), p. 64-73, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2023.09.002>.

GARLET, T. B.; SAVIAN, F. S.; RIBEIRO, J. L. D.; SILUK, J. C. M. Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49 (D), p. 553-570, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.227>.

HASSAN, N. S.; JALIL, A. A.; RAJENDRAN, S.; KHUSNUN, N. F.; BAHARI, M. B.; JOHARI, A.; KAMARUDDIN, M. J.; ISMAIL, M. Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 52 (B); p. 420-441, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.068>.

HARICHANDAN, S.; KAR, S. K.; RAI, P. K. A systematic and critical review of green hydrogen economy in India. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48 (81), p. 31425-31442, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.316>.

HUANG, Z.; YUAN, S.; WEI, H.; ZHONG, L.; HU, Z.; LIU, Z.; LIU, C.; WEI, H.; ZHOU, L. Effects of hydrogen injection timing and injection pressure on mixture formation and combustion characteristics of a hydrogen direct injection engine. *Fuel*, v. 363, p. 130966, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130966>.

JAYAPRABAKAR, J.; ARUNKUMAR, T.; RANGASAMY, G; PARTHIPAN, J.; ANISH, M.; VARSHINI, G.; KUMAR, B. K. Prospectus of hydrogen enrichment in internal combustion engines: Methodological insights on its production, injection, properties, performance and emissions. *Fuel*, v. 363, p. 131034, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131034>.

CHELVAM, K.; HANAFIAH, M. M.; WOON, K. S.; ALI, K. A. A review on the environmental performance of various hydrogen production technologies: An approach towards hydrogen economy. *Energy Reports*, v. 11, p. 369-383, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.060>.

LI, Z.; LIU, J.; JI, Q.; SUN, P.; WANG, X.; XIANG, P. Influence of hydrogen fraction and injection timing on in-cylinder combustion and emission characteristics of hydrogen-diesel dual-fuel engine. *Fuel Processing Technology*, v. 252, p. 107990, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107990>.

MALIK, M. A. I.; MUJTABA, M. A.; KALAM, M. A.; SILITONGA, A. S.; IKRAM, A. Recent advances in hydrogen supplementation to promote biomass fuels for reducing greenhouse gases. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49 (D), p. 463-487, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.154>.

MOKHEIMER, E. M. A.; SHAKEEL, M. R.; HARALE, A.; PAGLIERI, S.; MANSOUR, R. B. Fuel reforming processes for hydrogen production. *Fuel*, v. 359, p. 130427, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130427>.

WINANGUN, K.; SETIYAWAN, A.; SUDARMANTA, B.; PUSPITASARI, I.; DEWI, E. L. Investigation on the properties of a biodiesel-hydrogen mixture on the combustion characteristics of a diesel engine. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 8, p. 100445, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100445>.

ZAINAL, B. S.; KER, P. J.; MOHAMED, H.; ONG, H. C.; FATTAH, I. M. R.; RAHMAN, S. M. A.; NGHIEM, L. D.; MAHLIA, T. M. I. Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 189(A), p. 113941, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA CADEIA DO HIDROGÊNIO VERDE

**LUCIANO TAVARES ⁽¹⁾; SAMUEL D. VASCONCELOS ⁽²⁾; CAYO CID
DE FRANCA MORAES ⁽³⁾; DIEGO DE MOURA REBOUÇAS ⁽³⁾.**

**⁽¹⁾ IATI – INSTITUTO AVANÇADO DE TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO; ⁽²⁾ UFPE - UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO; ⁽³⁾ EDP BRASIL.**

RESUMO

O hidrogênio molecular, equiparado à eletricidade como vetor energético, desempenha um papel crucial na transição para fontes sustentáveis. Atualmente, sua produção, predominantemente derivada de combustíveis fósseis, demanda uma transição para tecnologias mais sustentáveis, como a eletrólise para a obtenção de hidrogênio verde. Este estudo tem como objetivo realizar uma análise abrangente dos cenários e configurações da cadeia de produção do hidrogênio verde, com foco na identificação dos principais pontos que impactam sua eficiência energética. Considerando o contexto do uso do hidrogênio como vetor de energia, a cadeia do hidrogênio tem duas configurações principais: Power-to-Gas (P2G) e Power-to-Gas-to-Power (P2G2P).

No primeiro cenário, P2G, o hidrogênio é produzido a partir de fontes de energia renovável, pelo processo da eletrólise, podendo passar pelas etapas de armazenamento e compressão [1]. Após a produção, o hidrogênio verde pode ser diretamente utilizado como fonte de energia ou como insumo em diversas aplicações industriais, como combustível veicular, industrial (caldeiras, fornos, etc.), e na indústria química para sínteses orgânicas, como hidrogenação de hidrocarbonetos, transformação de gorduras em óleos vegetais, produção de amônia e metanol, entre outros usos. Alternativamente pode ser injetado na rede de gás natural.

No segundo cenário, P2G2P, o hidrogênio verde é considerado um meio de armazenamento de energia renovável, sendo produzido por eletrólise e, na etapa final, o hidrogênio armazenado é reconvertido em energia elétrica, utilizando uma célula de combustível [1]. Esse cenário viabiliza o uso de energias renováveis como solar e eólica sob demanda, pois, por sua própria natureza, são formas de geração de energia que não permitem esse tipo de controle.

Dada a abrangência da aplicação do hidrogênio, o estudo foi realizado considerando os cenários mencionados, contemplando os estágios necessários para o armazenamento e uso final do insumo. Observou-se que alguns processos impactam consideravelmente a eficiência da transformação da energia na cadeia do hidrogênio verde, como os estágios de elevação de pressão para armazenamento e transporte.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio verde, eficiência energética, conversão energia gás, conversão energia gás energia, cadeia do hidrogênio verde.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o problema de emissão de gases de efeito estufa transcende fronteiras, configurando-se como uma questão global. Diante desse cenário, em 2015 diversas nações colaboraram na elaboração do Acordo de Paris, objetivando a progressiva eliminação da utilização do carvão [2]. Mediante acordos e metas delineadas, países como Canadá, Chile, Finlândia, Hungria, Itália, Holanda e Portugal comprometeram-se a extinguir a utilização de carvão até o ano de 2030. Uma meta adicional estipulada pelo Acordo de Paris consiste na instituição de taxas sobre a emissão de carbono, com o intuito de desencorajar sua utilização. Paralelamente, mesmo sem estabelecerem acordos específicos quanto ao uso do carvão, nações como Colômbia, Japão, Noruega e Estados Unidos já implementam taxações sobre a emissão de CO_2 .

Nesse contexto, visando atender à prerrogativa de redução das emissões de gases de efeito estufa, o hidrogênio emergiu como uma tecnologia inovadora, buscando suprir a demanda por energia sem a concomitante emissão de CO_2 . O hidrogênio pode ser obtido de diversas formas, que se diferenciam principalmente pela utilização ou não de matéria-prima de origem fóssil, bem como pela emissão ou não de CO_2 durante o processo de produção do hidrogênio. Para distinguir as distintas cadeias de obtenção do hidrogênio, foi estabelecida uma terminologia de cores, na qual cada matiz denota o hidrogênio obtido por um processo distinto. A Tabela 1 apresenta as principais terminologias amplamente aceitas, além de detalhar as especificidades de cada uma das categorias.

Tabela 1 - O espectro de cor do hidrogênio e as indicações para as emissões de carbono. Fonte: adaptado de [3].

	Terminologia	Tecnologia de produção	Matéria prima/ fonte de energia para o processo	Pegada de carbono
Produção via eletricidade	Verde	Eletrólise	Solar, hídrica, vento, maré, geotérmica	Mínima
	Rosa		Nuclear	
	Amarelo		Energia mista da rede	Média
Produção via combustíveis fósseis	Azul	Reforma de gás natural com captura de carbono e gaseificação com captura de carbono	Gás natural, carvão	Baixa
	Turquesa	Pirólise	Gás natural	Carbono sólido
	Cinza	Reforma de gás natural		Média
	Marrom	Gaseificação	Carvão marrom	Alta
	Preto		Carvão	

Considerando a eletrólise para a produção do hidrogênio e no caso de utilizar energia proveniente de fontes renováveis, como solar, hídrica, eólica, geotérmica ou de marés, o hidrogênio resultante é denominado "verde". O hidrogênio verde, produzido com emissões nulas de CO₂, se posiciona como um vetor de energia renovável, desempenhando um papel crucial no aspecto ambiental, especialmente em setores nos quais a redução nas emissões de CO₂ não é uma tarefa simples.

Um exemplo é o setor de transporte a longa distância, no qual o uso de veículos movidos a hidrogênio verde pode reduzir a dependência do diesel. Outro exemplo é o setor siderúrgico, no qual o hidrogênio verde pode substituir total ou parcialmente o carvão utilizado no aquecimento das caldeiras. Além disso, o setor químico pode substituir o hidrogênio cinza, utilizado na produção de metano e amônia, pelo hidrogênio verde. Adicionalmente, o hidrogênio verde pode desempenhar o papel de elemento balanceador a longo prazo, aumentando a flexibilidade da matriz energética e servindo como solução para o armazenamento de energia em períodos prolongados.

Contudo, o hidrogênio verde como estratégia de descarbonização da economia é amplamente criticado por fatores como o custo elevado de produção devido à necessidade de infraestrutura e tecnologias em desenvolvimento, a eficiência energética considerando o consumo de energia pela eletrólise, a escalabilidade devida a desafios técnicos e econômicos para grandes sistemas de produção e a competição com outras tecnologias e fontes renováveis tecnologicamente mais maduras como solar, eólica e o armazenamento de energia em baterias.

Dado o contexto, esse tudo propõe contribuir com uma análise de cenários de configuração da cadeia de produção de hidrogênio verde, focando na identificação dos principais fatores que impactam sua eficiência energética, um dos pilares essenciais para a concretização desta transição energética.

2. CENARIOS DA UTILIZAÇÃO DO HIDROGENIO VERDE

Diferentemente da energia elétrica, que tem apenas uma forma de apresentação por meio de cargas elétricas (elétrons e prótons), a utilização do hidrogênio verde como vetor energético pode ser observada em diferentes formas, uma vez que a energia nele contida pode ser convertida em diferentes formas como calor, eletricidade etc. Para cada tipo de conversão, existe uma configuração da cadeia do hidrogênio verde. Entre esses tipos destacam-se dois cenários principais: *Power-to-Gas* (P2G) e *Power-to-Gas-to-Power* (P2G2P).

No primeiro cenário, P2G, o hidrogênio verde é obtido a partir da energia elétrica de fontes renováveis através da quebra da molécula da água, processo também conhecido como eletrólise [1]. Após a produção, o hidrogênio verde pode ser diretamente utilizado como fonte de energia ou como insumo em diferentes aplicações industriais, como por exemplo a utilização como combustível veicular em aplicações de transporte, no meio industrial como fonte de energia para processos térmicos envolvendo a operação de caldeiras, fornos, etc., e na indústria química como insumo para sínteses orgânicas, como hidrogenação de hidrocarbonetos, transformação de gorduras em óleos vegetais, produção de amônia e metanol, entre outros usos.

No segundo cenário, P2G2P, o hidrogênio verde é visto como um meio de armazenamento de energia renovável, sendo produzido, armazenado e, quando necessário, convertido novamente em energia elétrica, através de uma célula de combustível [1]. Esse cenário possibilita o uso de energias renováveis como solar e eólica sob demanda, pois, por sua própria natureza, são formas de geração de energia que não permitem esse tipo de controle.

Dada a abrangência da aplicação do hidrogênio, o estudo foi realizado considerando os dois cenários mencionados, contemplando os estágios necessários para o armazenamento e uso final do insumo. Observou-se que alguns processos impactam consideravelmente a eficiência da transformação da energia na cadeia do hidrogênio verde, como os estágios de elevação de pressão para armazenamento e transporte[4].

2.1. CADEIA DO HIDROGÊNIO VERDE

Os principais elementos que compõem a cadeia de hidrogênio verde são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A seguir será descrita cada etapa da cadeia do hidrogênio verde.

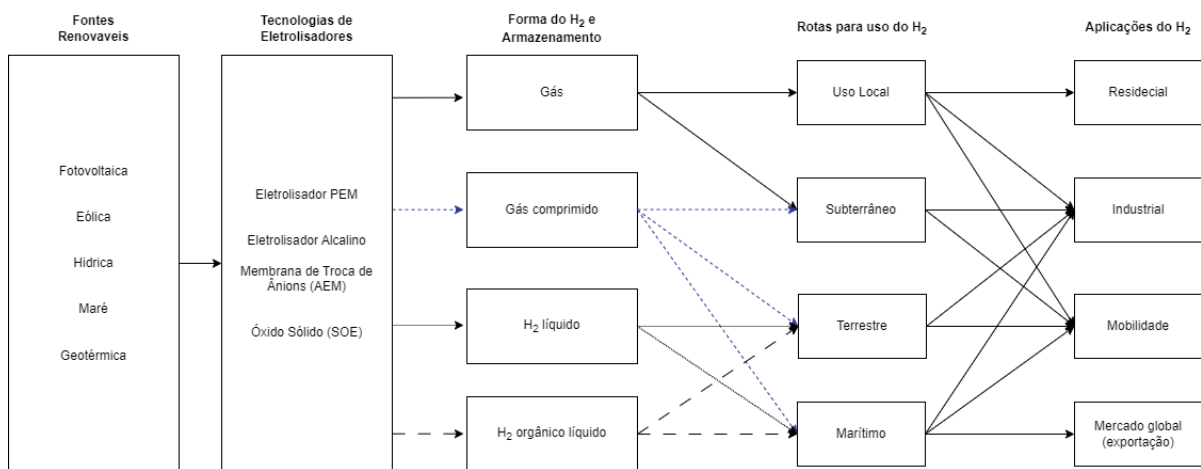


Figura 1- Principais elementos da cadeia de hidrogênio verde. Fonte: Próprio autor.

- **Fontes Renováveis**

As fontes de energia renovável desempenham um papel crucial na busca por alternativas sustentáveis e ecologicamente responsáveis para atender às crescentes demandas energéticas da sociedade contemporânea. A definição em constante evolução de energia renovável destaca a importância do período necessário para substituir essas fontes, ressaltando que a taxa de consumo deve ser cuidadosamente equilibrada em relação à capacidade da natureza de renová-las. Esse princípio sublinha a necessidade de uma abordagem equilibrada que evite a exploração excessiva e promova a gestão sustentável desses recursos.

No contexto específico do hidrogênio, a atenção concentra-se principalmente nas tecnologias fotovoltaicas e eólicas, devido aos significativos avanços observados nos últimos anos e à facilidade de implementação. Por outro lado, tecnologias como hídras, de marés e geotérmica são consideradas opções secundárias devido aos desafios mais complexos relacionados à sua implantação [5].

- **Tecnologias de Eletrolisadores**

O eletrolisador desempenha um papel central na produção do hidrogênio verde, realizando a divisão das moléculas de água em hidrogênio e oxigênio por meio da aplicação de

energia gerada a partir de fontes renováveis. No atual panorama, duas tecnologias de eletrolisadores predominam comercialmente: o eletrolisador alcalino e o eletrolisador PEM.

O método alcalino de produção de hidrogênio é uma tecnologia consolidada e com produção comercial na faixa de megawatts. O processo de produção de hidrogênio pelo método alcalino consiste na eletrólise da água usando uma solução alcalina (como NaOH ou KOH) como eletrólito e eletrodos de metal (como níquel ou ferro) com ânodo e cátodo. Nessa reação ($2H_2O + 2OH^- \rightarrow O_2 + H_2 + 2OH^-$), o oxigênio é liberado no ânodo e o hidrogênio é liberado no cátodo. A solução alcalina facilita a condução da corrente elétrica e aumenta a eficiência do processo.

O processo de eletrólise alcalina de água inicia-se no lado catódico, onde duas moléculas da solução alcalina são reduzidas a uma molécula de hidrogênio H_2 , gerando dois íons hidróxidos OH^- como subproduto. O H_2 produzido se desprende do catodo e recombina-se em estado gasoso, enquanto os íons OH^- são transferidos sob a influência do circuito elétrico entre o ânodo e o cátodo. Os íons OH^- transferidos para o anodo descarregam formando meia molécula de oxigênio (O_2), e uma de molécula de água (H_2O), o O_2 se recombinará na superfície do eletrodo e escapará como hidrogênio conforme ilustrado na Figura 2 [6] [7].

A eletrólise alcalina opera em temperaturas mais baixas em comparação a outros métodos de eletrolise, geralmente entre 40 °C a 90 °C. No entanto, o método alcalino apresenta desafios como densidades de corrente limitadas (abaixo de 400 mA/cm²) e a baixa pressão operacional de 3 a 30 bar.

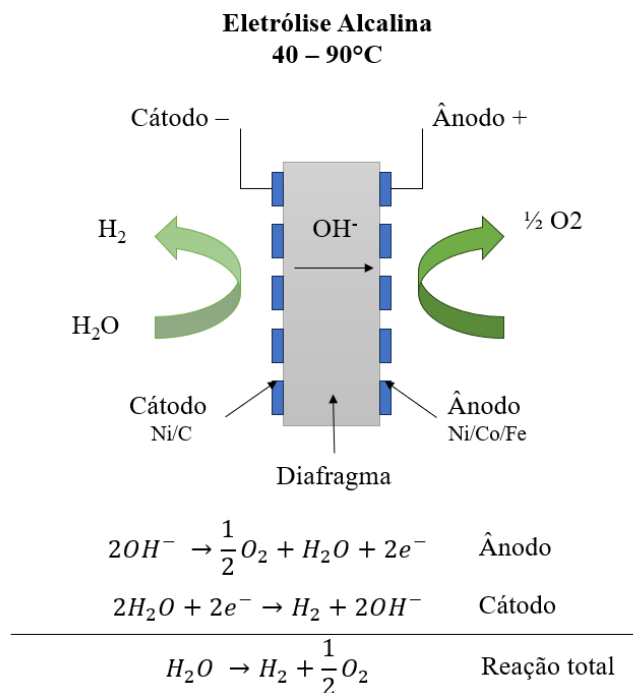


Figura 2 - Princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise de água alcalina. Fonte:[8].

No método de eletrólise de água PEM, a água é dividida em hidrogênio e oxigênio nos respectivos eletrodos, com o hidrogênio no cátodo e o oxigênio no ânodo. Nesse processo, a água é acumulada por um bombeador de água e direcionada ao ânodo, onde ocorre a liberação de oxigênio (O_2), 1 mol de hidrogênio (H^+) e elétrons (e^-). O mol de hidrogênio presente no

ânodo reage quando submetido à água, sendo conduzido através de uma membrana condutora de prótons até o lado do cátodo. Os elétrons deixam o ânodo através do circuito externo de energia, fornecendo a força motriz (tensão da célula) para a reação. No cátodo, os mols de hidrogênio e elétrons se recombina, resultando na produção de hidrogênio no formato gasoso. O esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise do tipo PEM é ilustrado na Figura 3.

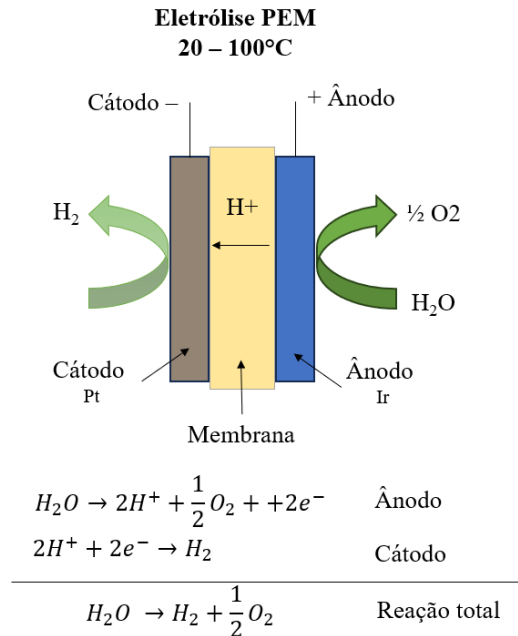


Figura 3 - Esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrólise do tipo PEM.
Fonte: [8].

Opções como a membrana de troca de ânions alcalinos (AEM) e o Eletrolisador de Óxido Sólido (SOE) estão atualmente em fase de desenvolvimento. O AEM utiliza técnicas combinadas das tecnologias PEM e alcalina, incorporando a membrana da tecnologia PEM e os ânions alcalinos do eletrolisador alcalino. Já a opção de Óxido Sólido utiliza vapor e opera a uma temperatura mais elevada em comparação com outras técnicas de eletrólise [7]. Cerca de um terço da energia necessária para o SOE é proveniente do calor, sendo preferencialmente conectado a uma fonte térmica de alta temperatura [7]. A eficiência do SOE é elevada devido à sua operação em alta temperatura [7]. Embora o SOE esteja menos desenvolvido em comparação com o AWE e o PEM, seu potencial é frequentemente destacado na literatura, ganhando crescente interesse[7].

- **Formas do Hidrogênio e Armazenamento**

Após a saída do eletrolisador, o hidrogênio se encontra em um estado gasoso de baixa pressão, assim pode ser usado localmente ou armazenado em contêineres subterrâneos conhecidos como cavernas de hidrogênio ou tanques de baixa pressão. No entanto, para o transporte, o hidrogênio pode assumir diferentes estados, como gasoso e líquido. A Figura 4 ilustra as opções de estado do hidrogênio para transporte e suas respectivas formas de armazenamento.

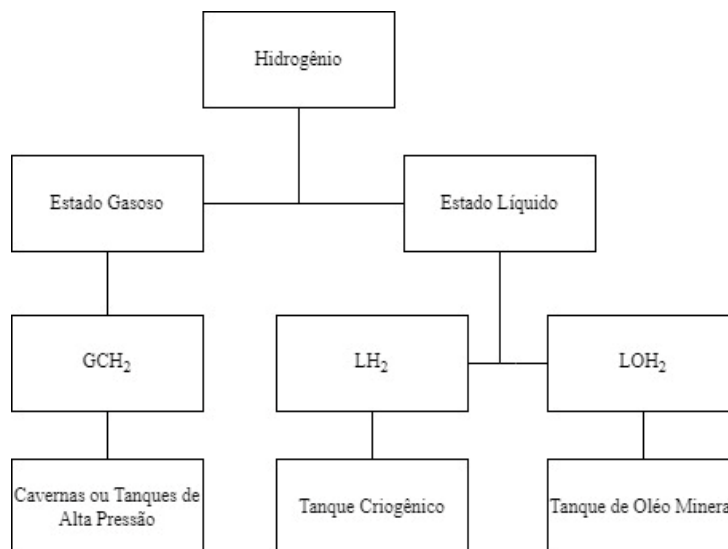


Figura 4 - Estado do hidrogênio para transporte e tipos de armazenamento

Na forma gasosa, o método GCH₂ (Gás Comprimido de Hidrogênio) é empregado, envolvendo a compressão do gás para facilitar o transporte. Esta compressão pode atingir valores de até 900 bar [9]. Para o hidrogênio na forma GCH₂, o armazenamento pode ser realizado em tanques de alta pressão ou em cavernas [10].

Já na forma líquida, existem duas configurações: Hidrogênio liquefeito (LH₂) e o método LOH₂ (Hidrogênio Orgânico Líquido). No método de hidrogênio liquefeito LH₂, o hidrogênio é transformado em estado líquido para transporte, proporcionando alta densidade energética, no entanto para o hidrogênio atingir o estado líquido deve-se estar a uma temperatura de -253° C. o que leva a necessidade de uma etapa de liquefação energeticamente onerosa [10]. Nessa opção o armazenamento é feito através de tanques criogênicos pela baixa temperatura [9].

No método LOH₂, o hidrogênio é transportado na forma de outra substância com baixo valor energético. processo denominado de hidrogenação. Exemplos de substâncias são o tolueno, metanol e amônia. Nesse método, no local de entrega ou local de aplicação do hidrogênio, um novo processo denominado desidrogenação é utilizado para retirar o hidrogênio da substância de transporte, um dos benefícios é o fato de que as substâncias de transportes são líquidos em condições ambientais. Outros benefícios consistem na semelhança aos derivados do petróleo bruto, podendo ser utilizada a infraestrutura pré-existente com poucas modificações. Como forma de armazenamento pode ser utilizado um tanque de óleo mineral [10].

- **Rotas para o Uso do Hidrogênio**

Em linhas gerais, as principais formas de transporte do hidrogênio são a rota terrestre, marítima e subterrânea. Na rota terrestre, o transporte é realizado por caminhões ou trailers adaptados para o transporte do hidrogênio. A rota marítima envolve a utilização de navios ou barcos adaptados para o transporte do hidrogênio. Para barcos pequenos, a função primária é o transporte do hidrogênio, semelhante às opções terrestres [11], No entanto, para embarcações marítimas de grande porte, não há a necessidade de adaptação na embarcação, apenas a disposição do armazenamento dentro do transporte [12]. A opção de rota marítima está associada principalmente ao transporte para longas distâncias ou na impossibilidade de rotas

terrestres e subterrâneas [10]. A rota subterrânea envolve o uso de gasodutos para o transporte do hidrogênio, sendo associada ao hidrogênio na forma gasosa, comprimido ou não. Essa opção possui o menor custo de implementação, uma vez que o hidrogênio pode utilizar gasodutos preexistentes [10][13].

- **Aplicações do Hidrogênio**

De forma geral, os principais usos do hidrogênio são os setores industriais, residencial, mobilidade e exportação. A seguir serão descritos cada um dos setores de uso.

- SETOR INDUSTRIAL

Quanto ao aspecto industrial, seis setores apresentam grande potencial na utilização do hidrogênio verde: a produção de cimento, a siderurgia, a mineração, a produção de vidro, combustíveis líquidos sintéticos e a agricultura.

A produção de cimento é um emissor de gases poluentes principalmente devido ao uso de combustíveis fósseis na queima do calcário [14]. No entanto, a indústria de cimento tem se comprometido junto ao Regime de comércio de Emissões, principal instrumento da União Europeia para reduzir as emissões das indústrias pesada, a reduzir suas emissões de CO₂ por meio da utilização de combustíveis alternativos e do desenvolvimento de novas tecnologias [15]. Os principais obstáculos a serem superados ao empregar hidrogênio na fabricação de cimento incluem potenciais efeitos nos elementos físicos do sistema de forno, nas correntes de combustível, no perfil térmico, na transferência de calor, e também abrangem considerações de segurança para a instalação fabril [14].

Como exemplo de projetos que visam realizar a redução de CO₂ neste setor, pode-se destacar as iniciativas da Associação Europeia de Cimento Cembureau, com projetos de redução da emissão de carbono utilizando tecnologias de captura e armazenamento de CO₂ e principalmente na substituição do combustível fósseis utilizado na queima do calcário por hidrogênio verde [14].

Na mineração, um setor historicamente intensivo em emissão de carbono, o hidrogênio verde é considerado como uma solução promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Um exemplo de solução é a utilização de pilhas a combustível de hidrogênio nas instalações para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e eliminar a necessidade de transporte de diesel para regiões isoladas, nas operações de mineração. O consórcio “Green Hydrogen” formado pelas multinacionais Anglo American, BHP e Fortescue busca identificar formas de utilizar o hidrogênio verde para acelerar a descarbonização das minas a nível global e eliminar os obstáculos para a implementação das tecnologias de hidrogênio verde [16][17].

A substituição de caminhões de transporte nas minas por veículos movidos a hidrogênio pode trazer enormes benefícios ambientais, já que esses caminhões têm elevado consumo de diesel. De fato, a eliminação das emissões de um único caminhão é equivalente à retirada de 50 carros de passeio à gasolina das ruas em termos de emissões de CO₂. Além disso, a geração de energia elétrica nas próprias minas, através de fontes de energia renovável e produção de hidrogênio verde, pode tornar as minas energeticamente autossuficientes.

O setor siderúrgico é um dos maiores emissores de CO₂ no mundo e consome cerca de 75% da demanda energética global de carvão [18]. Nesse campo, uma das soluções mais promissoras é o uso de hidrogênio verde na produção de aço. Como um exemplo de iniciativa, a ArcelorMittal, uma das maiores produtoras de aço do mundo, anunciou um projeto que visa produzir aço em larga escala utilizando 100% de hidrogênio verde como elemento redutor de

emissão de carbono da empresa. O projeto utiliza a tecnologia de ferro reduzido direto (DRI) em parceria com a empresa Midrex. Inicialmente, o hidrogênio será produzido a partir de gás natural (hidrogênio cinza ou azul), mas a longo prazo a empresa planeja utilizar energia eólica renovável para produzir hidrogênio verde que será utilizado na produção do aço [19].

A aliança europeia das indústrias de vidros (Glass Alliance Europe), Apresentou em seu Position Paper a relevância do setor de Vidro no impacto de emissões de carbono como no processo para a descarbonização das indústrias, O hidrogênio verde neste setor se apresenta como uma oportunidade pois ser utilizado em diferentes estágios do processo de fabricação [14]. Mas para isso enfrenta desafios, dentre eles estão a melhoria dos sistemas tradicionais de derretimento de vidros e o cumprimento das legislações cada vez mais rígidas relacionadas às emissões de CO₂, NO_x e SO_x. Algumas empresas, como a Nippon Sheet Glass, já reportaram o uso de hidrogênio como combustível alternativo. A expectativa é de que a utilização de hidrogênio possa reduzir as emissões de carbono em até 80% no setor [20].

O hidrogênio verde para a produção de combustíveis líquidos sintéticos (E-Combustíveis) vem atraindo atenção mundial pelo potencial de descarbonização. Nesse tipo de aplicação, o hidrogênio e o CO₂ passam por uma série de processos envolvidos na produção do chamado óleo sintético (syncrude) e posterior refino em combustíveis como diesel sintético, gasolina sintética ou ainda querosene de aviação sintético. Novos biocombustíveis como hidrogênio verde como o óleo vegetal hidrogenado (HVO – Hydrogenated vegetable oil) apresentam um mercado promissor em função das tecnologias de hidrogenação de bio-óleos disponíveis. No Brasil, tais tecnologias encontram-se em fase de testes e demonstração em campo[14]. Também existem diversos projetos em andamento no mundo, como por exemplo o Projeto alemão ProQR: prevê a partir de 2022 o fornecimento de e-fuel para aeroportos e pistas de pouso em regiões afastadas dos grandes centros urbanos, como a região amazônica brasileira [14].

Os fertilizantes desempenham um papel crucial na cadeia de produção agrícola, promovendo o aumento da produtividade por hectare e mitigando a degradação do solo agricultável. Entre os elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas, destacam-se os denominados macronutrientes, notadamente o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), empregados em larga escala. No contexto da cadeia produtiva de fertilizantes, o processo se inicia com a extração da matéria-prima, sendo o nitrogênio o componente básico para a produção de fertilizantes nitrogenados, como amônia e ureia. Para a obtenção da amônia, essencial na produção de fertilizantes, é necessário tanto o nitrogênio quanto o hidrogênio, cuja combinação resulta na amônia (NH₃), um processo conhecido como síntese de Haber-Bosch [14].

- MOBILIDADE

A mobilidade urbana é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂ [14], e a utilização de hidrogênio apresenta-se como uma opção eficiente para reduzir essas emissões. No entanto, é necessário o investimento na infraestrutura de abastecimento para viabilizar essa alternativa. O uso de hidrogênio na mobilidade consiste na utilização do hidrogênio como fonte de combustível para veículos movidos a células combustível. O veículo necessita de hidrogênio e oxigênio para produzir eletricidade e água. Pelo escapamento é eliminado apenas vapor de água, não havendo emissões de CO₂.

Um exemplo de modelos que já utilizam esta tecnologia são os veículos da Toyota da linha Mirai, ainda existem outros projetos associados a mobilidade utilizando o hidrogênio como o projeto Hydrogen Mobility Europe (H2ME) (<https://h2me.eu/>). Este é um exemplo de iniciativa que tem como objetivo busca expandir a rede de abastecimento de hidrogênio e das frotas de veículos movidos a pilha a combustível que operam, em diversas regiões da Europa.

Até o momento do estudo, o projeto já expandi-o a frota de veículos a hidrogênio em um total de 630 veículos e desenvolveu um total de 37 novos postos de reabastecimento espalhados em 8 países [14].

- RESIDENCIAL

Na Europa, já existem diversas iniciativas para implementação do uso de hidrogênio verde na geração de energia para residências e edifícios comerciais. O projeto "HyDeal Ambition" (<https://www.hydeal.com/hydeal-ambition>), liderado pela França e Espanha, tem como objetivo produzir hidrogênio verde a partir de energia solar na Península Ibérica¹ e transportá-lo para a França e outros países europeus através de gasodutos existentes. O hidrogênio será utilizado para substituir o gás natural na geração de calor e eletricidade nas residências e indústrias, com a expectativa de reduzir as emissões de CO₂ em até 95% [18].

Outros projetos incluem a construção de edifícios com sistemas de energia renovável, com células a combustível de hidrogênio, que permitem a geração de eletricidade e calor de forma autônoma, sem a necessidade de conexão com a rede elétrica [18]. O hidrogênio verde é uma alternativa viável e eficiente para a geração de energia limpa em residências e edifícios comerciais, e sua implementação em larga escala pode contribuir significativamente para a redução das emissões de CO₂ e a mitigação das mudanças climáticas.

- MERCADO GLOBAL (EXPORTAÇÃO)

Na Europa e na Ásia, observa-se a transição em direção às "Sociedades de Hidrogênio", onde as economias, especialmente nos setores industrial e de transporte, planejam uma ampla adoção de hidrogênio verde nos próximos trinta anos. Além disso, países da União Europeia, comprometidos com metas ambiciosas de descarbonização até 2050, por meio do Pacto Ecológico Europeu (European Green Deal), assim como outras nações globais signatárias do Acordo de Paris, inevitavelmente buscarão colaborações internacionais para atender às crescentes necessidades domésticas de hidrogênio verde. Nesse contexto, a produção e exportação de hidrogênio verde se delineiam como uma nova arena de oportunidades de negócios para países que possuem maior capacidade de produção desse recurso, destacando-se o Brasil [14].

3. ANÁLISE DA EFICIENCIA DA CADEIA DO HIDROGENIO VERDE

Conforme apresentado, o hidrogênio verde atualmente destaca-se como uma das principais apostas de caminho para a economia de baixo carbono. Contudo, considerando as possibilidades de uso do hidrogênio, a comparação desse potencial vetor energético com a eletricidade, do ponto de vista da cadeia de geração, transporte e utilização, não é uma tarefa simples. Isso torna a análise para comparação da eficiência energética desses vetores de energia um desafio.

Nesse trabalho, com o objetivo de analisar a eficiência da cadeia do hidrogênio verde, foi escolhido o cenário mais completo P2G2P por duas razões principais. A primeira é que esse cenário é um caso mais amplo, que contém o cenário P2G, portanto é um cenário mais completo que considera as etapas de compressão e armazenamento, cujas análises em muitos dos casos, não são consideradas em outros trabalhos similares. A segunda razão é que esse cenário é o que mais se assemelha à conhecida cadeia de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, o que torna a análise um pouco mais didática do ponto de vista de facilitar a comparação entre o hidrogênio e a eletricidade, enquanto vetores energéticos.

A análise de eficiência da cadeia foi feita através de uma busca na literatura tanto técnica-comercial quanto acadêmica a respeito de informações sobre as eficiências dos

processos e equipamentos envolvidos nas principais etapas da cadeia: A geração de energia para a produção de hidrogênio verde, a eletrólise, a compressão, o armazenamento e a célula a combustível.

2.2. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

A energia renovável desempenha um papel fundamental na produção sustentável de hidrogênio, minimizando as emissões de dióxido de carbono. Fontes de energia renovável, tais como hidroeletricidade, biomassa e energia geotérmica, são alternativas viáveis. No entanto, a energia solar e eólica tem atraído maior atenção devido à sua ampla disponibilidade, facilidade de implementação e custos de implantação decrescentes ao longo dos últimos anos [4].

O artigo [21] demonstra que a eficiência na conversão de energia solar em eletricidade é fortemente influenciada pelo tipo de célula solar e pelas condições operacionais. Células fotovoltaicas convertem uma faixa específica de comprimento de onda da radiação solar em eletricidade, dissipando o restante como calor. No mercado, as células de silício são predominantes, com subdivisões em monocristalino, policristalino e amorfo. As células de silício monocristalino exibem a maior eficiência de conversão, atingindo aproximadamente 12-15%, podendo chegar a 22,7% em casos excepcionais. Já as células de silício policristalino têm uma eficiência entre 11% e 14%, enquanto as de silício amorfo ficam na faixa de 6% a 7% [22].

A elevação da temperatura das células solares resulta em reduções na eficiência elétrica dos painéis fotovoltaicos, com uma queda de 0,4% a 0,65% por grau adicional de temperatura. Aumentar a temperatura do painel acima de 25 °C resulta em redução de 0,08% na eficiência elétrica e 0,65% na produção de energia. Portanto, a eficiência e a seleção de locais com alta irradiação solar tornam-se elementos cruciais.

No que diz respeito à produção eólica, de acordo com [23], a eficiência energética média gira em torno de 80%, variando de 60% a 90%. Essa variação se deve, principalmente, à influência significativa da velocidade média do vento na produção de energia eólica. A densidade do ar também exerce um papel importante, embora com impacto menor em comparação com a velocidade do vento. Outros fatores, como temperatura, altitude, umidade, inclinação do terreno, turbulência, sujeira nas pás do rotor e a idade do equipamento, também contribuem para as perdas de eficiência, somando aproximadamente 3% [23].

Esses resultados destacam a importância da localização estratégica de parques eólicos e sistemas fotovoltaicos, bem como a influência significativa de fatores ambientais na eficiência da produção de energia solar e eólica.

2.3. ELETRÓLISE

Não há dúvidas que, no contexto da cadeia do hidrogênio verde, o eletrolisador é a figura de destaque. Dessa forma, a análise da eficiência da cadeia passa obrigatoriamente pela análise criteriosa da eficiência desse dispositivo. Adicionalmente, a eficiência dos eletrolisadores é crucial para a análise da cadeia de hidrogênio verde, pois determina o consumo de energia elétrica, tendo forte influência no custo de produção do hidrogênio.

No entanto, obter um número ou parâmetro único que represente a eficiência do eletrolisador é um desafio. Primeiro, como vimos, os eletrolisadores tem diferentes tecnologias

que atualmente competem entre si. Adicionalmente, as tecnologias de eletrolisadores podem variar conforme o tipo, a potência, a temperatura de operação, o custo e as condições de fornecimento de energia primária. Em linhas gerais, as principais tecnologias são o eletrolisador PEM e o eletrolisador alcalino. O eletrolisador alcalino é considerada uma tecnologia simples, relativamente barata e de alta confiabilidade, mas que possui menor eficiência quando comparado à tecnologia PEM. O eletrolisador PEM, por sua vez, é mais recente, possui maiores capacidades de produção por metro quadrado de implantação, é mais rápida e mais flexível.

Uma outra questão importante é sobre como será medida a eficiência do dispositivo. Parâmetros comumente vistos na especificação dos equipamentos, e que podem trazer informação sobre sua eficiência operacional, são a relação entre a energia elétrica consumida e a energia química do hidrogênio consumido, ou a relação entre a energia elétrica consumida e o volume de hidrogênio produzido, geralmente expresso através do montante de energia em kWh, necessário para a produção de um kg de hidrogênio (kg H_2).

Embora em alguns casos os dados de desempenho dos produtos não sejam amplamente divulgados, com a comparação dos dados obtidos, observa-se que os desempenhos são próximos, mas variam de acordo com a tecnologia adotada.

O eletrolisador PEM responde rapidamente às demandas de carga e inicializa rapidamente quando necessário. Além disso, o hidrogênio produzido pelo eletrolisador PEM pode atingir uma pureza elevada, de até 99,999%. No entanto, o uso de materiais nobres e o alto custo da membrana são desafios associados a essa tecnologia. Além disso, é importante notar que há uma considerável energia perdida no processo de eletrólise. A faixa de consumo de energia por hidrogênio produzido para essa tecnologia varia de 50,07 kWh/kg H_2 até 83,45 kWh/kg H_2 [24].

O eletrolisador alcalino (AWE) é uma tecnologia bem estabelecida e estável. No entanto, o eletrólito de água alcalina é corrosivo, requer cuidados de manutenção e pode produzir hidrogênio com uma pureza inferior em comparação com outras tecnologias. Além disso, é importante observar que a energia consumida no processo de eletrólise varia de 50,07 até 77,13 kWh/kg H_2 , valores de consumo maiores do que os de tecnologia PEM principalmente em pequenas potências [24].

O eletrolisador de Membrana de Troca de Ânions Alcalinos combina as soluções de membranas alcalinas de eletrólito sólido de modo a superar as desvantagens de outras tecnologias. Essa tecnologia possui boas capacidades de gerenciamento da flutuação de carga e apresenta vantagens como o baixo consumo de energia. A tecnologia tem o potencial de tornar-se uma solução com custo-benefício superior a outras tecnologias, contudo é uma tecnologia com baixo grau de maturidade, principalmente comparada a alcalina e PEM. A energia consumida no processo de eletrólise é de aproximados 53,39 kWh/kg H_2 , um valor menor do que muitas opções de eletrolisadores PEM e alcalino [24].

O eletrolisador de eletrólito de óxido sólido possui a vantagem de poder ser utilizado não apenas para a produção de hidrogênio, mas também como uma célula à combustível, tornando-o versátil para diferentes aplicações. Além disso, essa tecnologia apresenta uma alta eficiência e não requer materiais nobres, o que ajuda a reduzir os custos de capital. No entanto, os eletrodos utilizados no SOE podem ser instáveis, e questões relacionadas à segurança ainda precisam ser resolvidas. A energia perdida no processo de eletrólise varia de 27,84 até 38,98 kWh/kg H_2 , sendo a faixa toda de consumo menor que quaisquer outras tecnologia [24].

2.4. COMPRESSÃO

A compressão e armazenamento, frequentemente negligenciados em estudos da cadeia do hidrogênio, são elementos importantes na análise de eficiência. A compressão do hidrogênio é um processo que visa aumentar a densidade volumétrica do gás, facilitando o seu armazenamento e transporte. Nas etapas de transporte, armazenamento e utilização em estações de abastecimento, a compressão do hidrogênio é fundamental para otimizar o espaço e a eficiência do sistema. O hidrogênio pode ser comprimido em cilindros de alta pressão (até 700 bar) ou em tanques criogênicos (a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). A compressão do hidrogênio nas estações de abastecimento, considerando a aplicação do hidrogênio em meios de transporte, é essencial para garantir a pressão adequada para o enchimento dos tanques dos veículos.

As perdas associadas a esta etapa ocorrem principalmente devido ao processo de compressão tanto para o armazenamento, para o transporte como para o seu uso local na célula combustível, que demanda pressões mais elevadas. O consumo de energia varia de acordo com o nível de pressão e temperatura. Na compressão a baixa pressão (30-35 bar e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) o consumo de energia por kg de hidrogênio estimado é de 2,77 kWh/kg H_2 . Na compressão à média pressão (50-150 bar e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), o consumo é estimado na faixa de 3,95 a 10,9 kWh/kg H_2 . Em aplicações de alta pressão (350 bar e $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), 23 kWh/kg H_2 . No caso de compressão para liquefação do hidrogênio a temperaturas extremamente baixas ($-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 bar), observa-se um alto consumo de energia de 70,8 kWh/kg H_2 , e na compressão do hidrogênio na forma de amônia líquida a $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 1 bar, estima-se um consumo de 121 kWh/kg H_2 [4]. Além disso, são necessários cerca de 8 kWh/kg H_2 adicionais para recuperar o hidrogênio da amônia [25].

2.5. CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

Uma característica notável das células a combustível é sua eficiência superior quando comparadas aos motores à combustão, devido à menor perda de calor, atrito e gases resultantes. No caso da célula de combustível, estima-se uma eficiência de 40% a 60%, enquanto em motores a combustão a eficiência estimada está entre 20% e 25% [26][27]. Contudo, as eficiências das células de combustível são influenciadas por diversos fatores como a aplicação a qual se destina e as perdas térmicas relacionadas à tecnologia.

As células de combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC) são notáveis por atingir eficiências na faixa de 40 – 60%. Elas são conhecidas por sua resposta dinâmica rápida, adaptando-se em segundos às variações na entrega de hidrogênio. As PEMFC são versáteis e facilmente escaláveis, adequadas para uma ampla variedade de campos, desde veículos até aplicações estacionárias. No entanto, essas células requerem alta pureza de hidrogênio e cerca de 38% do consumo é perdida devido às perdas térmicas [26].

As células de combustível de óxido sólido (SOFC) possuem uma eficiência que varia de 30 a 60% e são conhecidas por sua alta capacidade de potência, podendo ser aplicadas em sistemas de grande porte. Por outro lado, as células SOFC têm uma resposta dinâmica mais lenta, levando horas para se adaptar em caso de variação na oferta de hidrogênio. Elas necessitam de uma pureza média do hidrogênio e por operar em altas temperaturas ($600\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$), apresentam uma redução das perdas causadas pelo efeito térmico [26].

As células de combustível de carbonato fundido de alta temperatura (MCFC) têm uma eficiência média de aproximadamente 43%. As células MCFC são adequadas para aplicações de médio e grande porte, operam com uma pureza média de hidrogênio e apresentam perdas de eficiência tanto pelas características intrínsecas da tecnologia quanto por elevadas perdas térmica [26].

As células de combustível de ácido fosfórico (PAFC) mantêm eficiências entre 40 e 50%. Elas são utilizadas principalmente em sistemas de cogeração pois são resistentes a utilização de hidrogênio com impuro. No entanto, assim como outras tecnologias de células de combustível, as PAFC também têm suas principais perdas associadas a perdas térmicas [26].

3. CONCLUSÃO

A pesquisa realizada revela pontos importantes para reflexão sobre a análise da cadeia de hidrogênio verde. No contexto no trabalho, as principais etapas da cadeia P2G2P foram definidas e analisadas com respeito ao consumo de energia e eficiência. Embora em alguns casos os dados de desempenho das soluções tecnológicas não sejam amplamente divulgados, os dados utilizados na análise foram levantados a partir de dados de publicações técnico-comerciais e outras referências da literatura.

Os eletrolisadores, peças-chave na produção de hidrogênio verde, tiveram suas principais tecnologias comparadas a partir do montante de energia elétrica necessário para a produção de um kg de hidrogênio (kWh/kg H_2). Nesse sentido, as tecnologias comparadas apresentaram desempenhos próximos, sendo o maior consumo observado na tecnologia PEM ($83,45 \text{ kWh/kg H}_2$) e o menor consumo na tecnologia eletrolisador de eletrólito de óxido sólido SOE ($38,98 \text{ kWh/kg H}_2$). Contudo, essas as tecnologias citadas possuem diferentes níveis de maturidade e, a depender da escala de implementação da produção e da janela temporal na qual se deseja utilizar o eletrolisador, esse e outros fatores precisam ser amplamente considerados.

Na etapa de compressão, observa-se uma ampla faixa de variação para o consumo que vai de 2 a 121 kWh/kg H_2 , proporcional ao nível de pressão desejado para uso local, armazenamento, transporte ou para aplicação em estações de abastecimento.

Com relação às células de combustível, de forma similar a análise dos eletrolisadores, diferentes tecnologias de células de combustível situam-se em uma faixa de 20% a 60%, competindo em diversos cenários.

De forma geral, a análise da eficiência da cadeia de hidrogênio verde não é uma tarefa simples pois a multiplicidade de caminhos e cenários para o uso do hidrogênio torna a comparação em alguns casos pouco prática. Além disso, algumas definições como o fato da cadeia possuir uma etapa de transporte, armazenamento na aplicação do hidrogênio podem mudar completamente o resultado.

Como resultado desse trabalho, destaca-se a complexidade inerente à produção e uso do hidrogênio verde, evidenciando desafios e variações com relação a eficiência energética em cada etapa da cadeia. Também ressaltam a importância de um olhar abrangente sobre esses processos, identificando pontos-chave para aprimoramentos e desenvolvimento tecnológico.

A busca incessante por fontes sustentáveis de hidrogênio está intrinsecamente ligada à necessidade de inovação constante, impulsionando a transição para uma matriz energética mais limpa e eficiente. Este estudo acrescenta uma contribuição, dentre outros trabalhos existentes, para um olhar cauteloso sobre a cadeia de produção de hidrogênio verde, dando os primeiros passos para a otimização da eficiência energética de diversas etapas e, conseqüentemente, contribuindo a consolidação de um futuro energético mais sustentável.

ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE GREEN HYDROGEN CHAIN

ABSTRACT

This article explores the pivotal role of molecular hydrogen as an energy carrier in the transition to sustainable sources, emphasizing the need to shift from fossil fuel-derived production to more eco-friendly technologies like electrolysis for green hydrogen. The study undertakes a thorough analysis of scenarios and configurations in the green hydrogen production chain, with a focus on identifying key factors affecting energy efficiency. Two primary configurations, Power-to-Gas (P2G) and Power-to-Gas-to-Power (P2G2P), are discussed. In the first scenario, P2G, hydrogen is produced from renewable sources through electrolysis, with applications ranging from direct energy use to industrial processes and integration into the natural gas grid. The second scenario, P2G2P, positions green hydrogen as a renewable energy storage medium, converted back into electrical energy using a fuel cell. This approach facilitates the utilization of on-demand renewable energies like solar and wind. The study encompasses stages from production to storage and final use of green hydrogen, identifying processes crucial for energy transformation efficiency, particularly highlighting the impact of pressure elevation during storage and transportation. Overall, the text underscores the importance of transitioning to sustainable hydrogen production methods and provides valuable insights into optimizing energy efficiency throughout the green hydrogen chain.

KEYWORDS: Green hydrogen, energy efficiency, P2G2P, gas-to-power conversion, gas-to-energy conversion, green hydrogen supply chain.

4. NOTAS EXPLICATIVAS

¹ A Península Ibérica é uma península localizada no sudoeste da Europa, separada do restante do continente europeu pelos Pirenéus, uma cadeia montanhosa que forma a fronteira natural entre a Espanha e a França.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. El-Shimy and A. N. Afandi, "Overview of Power-to-Hydrogen-to-Power (P2H2P) Systems Based on Variable Renewable Sources," *5th Int. Conf. Electr. Electron. Inf. Eng.*, vol. 1, October, no. October, pp. 1–6, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/319653679>
- [2] W. Cheng and S. Lee, "How Green Are the National Hydrogen Strategies?," *Sustain.*, vol. 14, no. 3, pp. 1–33, 2022, doi: 10.3390/su14031930.
- [3] N. Barhorst, *Green hydrogen*, vol. 2. 2020.
- [4] H. P. Bruce S, Temminghoff M, Hayward J, Schmidt E, Munnings C, Palfreyman D, "Australia National Hydrogen Roadmap," p. 92, 2018.
- [5] J. Brauns and T. Turek, "Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review," *Processes*, vol. 8, no. 2, 2020, doi: 10.3390/pr8020248.
- [6] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.

- [7] M. M. Rashid, M. K. Al Mesfer, H. Naseem, and M. Danish, “Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis,” *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, no. 3, pp. 2249–8958, 2015.
- [8] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten, “A comprehensive review on PEM water electrolysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 12, pp. 4901–4934, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [9] F. Stöckl, W. P. Schill, and A. Zerrahn, “Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-92511-6.
- [10] M. Niermann, S. Timmerberg, S. Drünert, and M. Kaltschmitt, “Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, no. July 2020, p. 110171, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110171.
- [11] BIG HIT, “project bighit,” 2022.
- [12] M. Reuß, T. Grube, M. Robinius, P. Preuster, P. Wasserscheid, and D. Stolten, “Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model,” *Appl. Energy*, vol. 200, pp. 290–302, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.050.
- [13] C. Yang and J. Ogden, “Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 2, pp. 268–286, 2007, doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.009.
- [14] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, “Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde,” pp. 1–114, 2021, [Online]. Available: www.energypartnership.com.br
- [15] DW, “Carbon-intensive-cement-industry-feeling-the-heat,” 2019. <https://www.dw.com/en/carbon-intensive-cement-industry-feeling-the-heat/a-50546807> (accessed Jan. 24, 2024).
- [16] Anglo American, “Bigger is better: on board the world’s largest electric mining vehicle,” 2020. <https://www.mining-technology.com/features/bigger-is-better-on-board-the-worlds-largest-electric-mining-vehicle/>
- [17] H2VIEW, “Mining giants form green hydrogen consortium,” 2020. <https://www.h2-view.com/story/mining-giants-form-green-hydrogen-consortium/> (accessed Jan. 04, 2024).
- [18] IEA, “Global Hydrogen Review 2022,” *Glob. Hydrog. Rev. 2022*, 2022, doi: 10.1787/a15b8442-en.
- [19] arcelormittal, “hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg,” 2020, [Online]. Available: <https://corporate.arcelormittal.com/media/case-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg>
- [20] P. Agreement, E. Commission, and G. A. Europe, “The European glass sector contribution to a climate neutral economy,” no. June, pp. 1–9, 2019.
- [21] R. Stropnik and U. Stritih, “Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM,” *Renew. Energy*, vol. 97, pp. 671–679, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.06.011.
- [22] C. T. Machado and F. S. Miranda, “Photovoltaic solar energy: A briefly review,” *Rev. Virtual Quim.*, vol. 7, no. 1, pp. 126–143, 2015, doi: 10.5935/1984-6835.20150008.

- [23] S. Pieralli, M. Ritter, and M. Odening, “Efficiency of wind power production and its determinants,” *Energy*, vol. 90, pp. 429–438, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.055.
- [24] M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara, and H. Hassan, “A review of water electrolysis–based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 58, pp. 86994–87018, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-23323-y.
- [25] T. N. Veziroğlu and S. Şahin, “21st Century’s energy: Hydrogen energy system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 7, pp. 1820–1831, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.08.015.
- [26] L. Forndal and J. Greiff, “System Study of the Techno- Economic Potential of a Hydrogen System,” 2022.
- [27] J. Kotowicz, D. Węcel, and M. Jurczyk, “Analysis of component operation in power-to-gas-to-power installations,” *Appl. Energy*, vol. 216, no. February, pp. 45–59, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.050.

6. GLOSSÁRIO

P2G	<i>Power-to-Gas</i>
P2G2P	<i>Power-to-Gas-to-Power</i>
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i> ou membrana de troca de prótons
AEM	<i>Anion Exchange Membrane</i> ou membrana de troca aniônica
SOE	Eletrólito de Óxido Sólido
AWE	Eletrolisador alcalino
GCH ₂	Gás Comprimido de Hidrogênio
LH ₂	Hidrogênio Liquefeito
LOH ₂	Hidrogênio Orgânico Líquido
HVO	<i>Hydrogenated Vegetable Oil</i>
PEMFC	Células de Combustível de Membrana de Troca de Prótons
SOFC	Células de Combustível de Óxido Sólido
MCFC	Células de Combustível de Carbonato Fundido de Alta Temperatura
PAFC	Células de Combustível de Ácido Fosfórico



Estudos de Viabilidade Técnico-Econômica para Projetos de Hidrogênio Verde. Luís Meca e Rodolfo Rosa



Hitachi Energy
Power Consulting





Power Consulting – Hitachi Energy Brasil

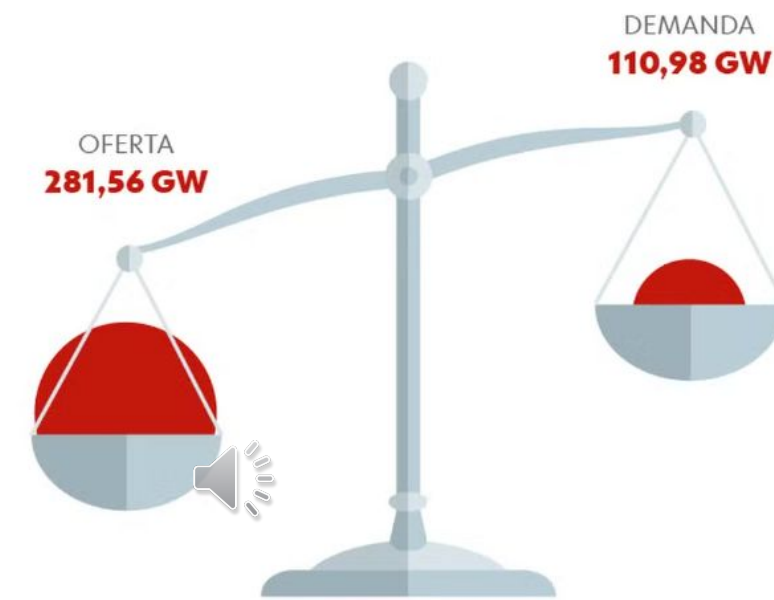


Hitachi Energy Power Consulting



Oferta de energia será mais que o dobro da demanda

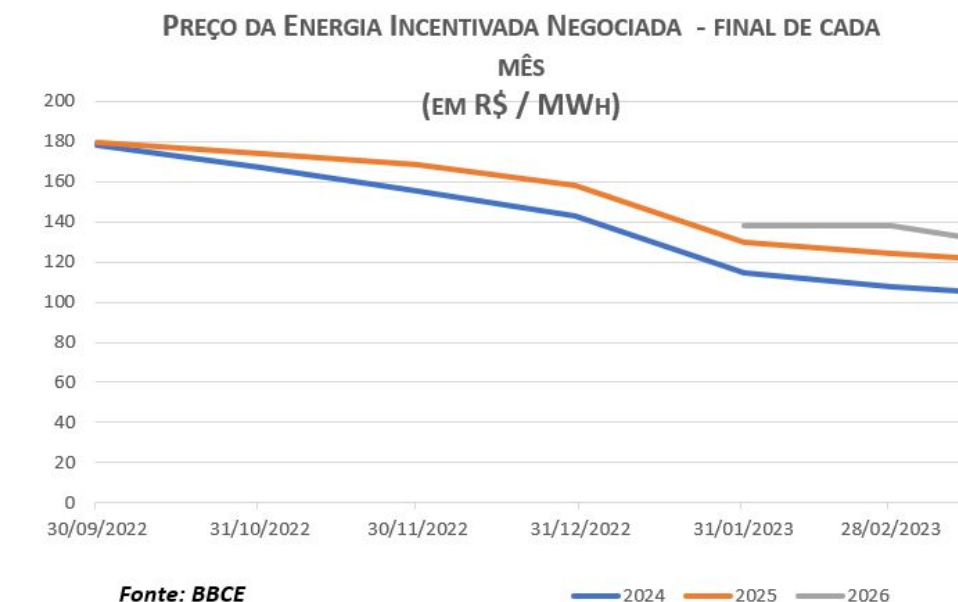
ONS projeta 281,5 gigawatts de capacidade ao final de 2027



g1 Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) Infográfico elaborado em: 16/02/2024

Oferta de energia será mais que o dobro da demanda — Foto: Editoria de Arte/g1

Fonte 2



Fonte 3



Fonte 4

O que fazer com os seus investimentos em energia solar e eólica ?

Esperar que as chuvas parem e o preço da energia volte a subir?

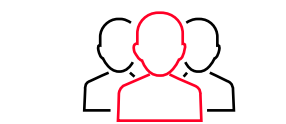


Investir em uma Planta de Hidrogênio Verde para consumir a própria energia eólica ou solar gerada?

Haveria alguém capacitado para dar Consultorias de Mercado, de Elétrica e de Processo?

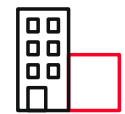
Hitachi Energy Power Consulting

Capacidades:



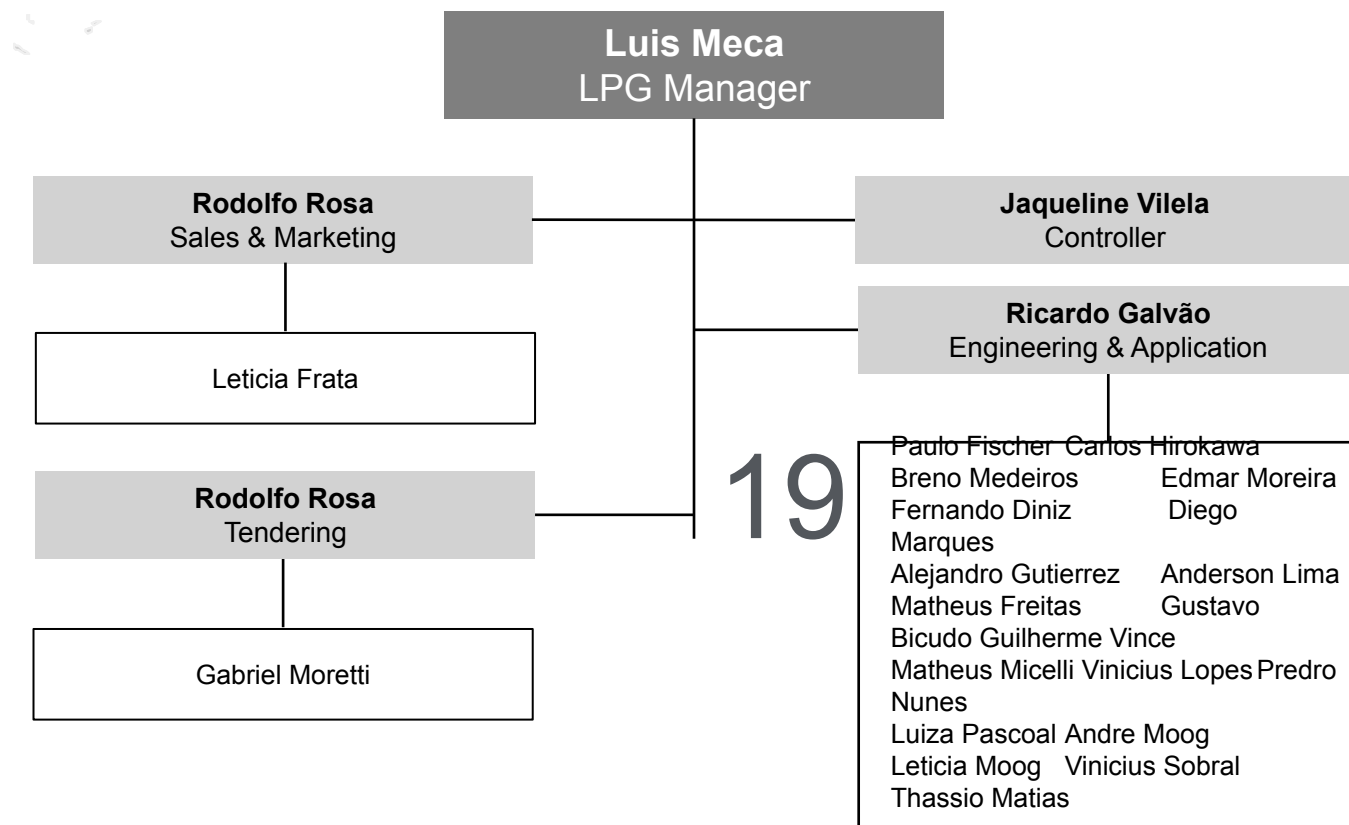
170

Consultores

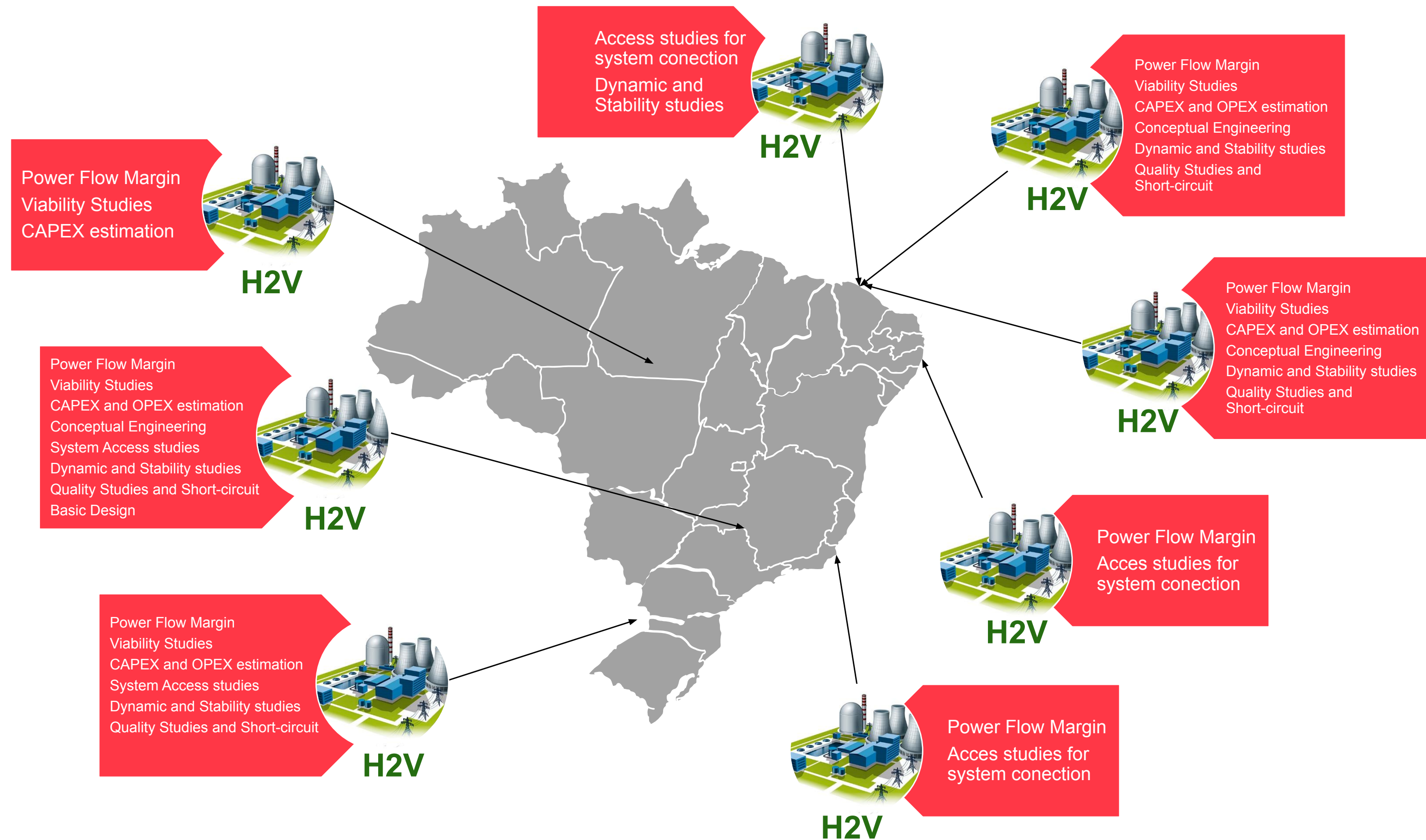


8

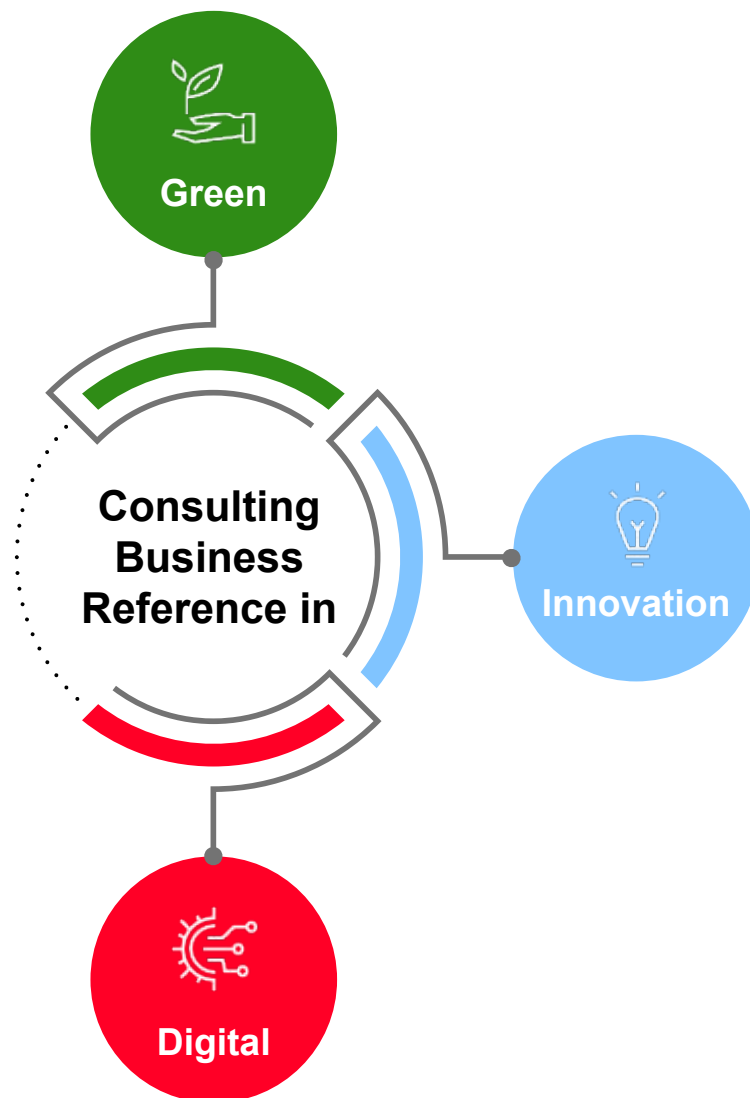
Centros de
excelência



Hitachi Energy Power Consulting



Hitachi Energy Power Consulting



Comprehensive services to support Net-Zero transformation

- Corporate Decarbonization Strategy and Implementation
- One-shop solution for RES, Industry and Transportation sectors. **Consulting Leader in Offshore Wind Industry**
- Net-Zero Project Design and Management

Provide novel solutions to new challenges

- Create holistic solution:
 - Advanced grid analysis tool and software solutions to embed internal know-how and define Grid Resilience roadmap
 - Integrated (digital) product offerings

Technical expertise to deliver data driven insights

- Digitalization roadmap incl. optimal placement of digital assets
- Advanced Analytics (incl. AI/ML) to correlate data with operational performance/risks
 - **Improve system availability, predictability and energy resilience**

Soluções Adequadas às
Necessidades de cada
Projeto , para Todas as
Etapas do Acesso

Aspectos Técnicos

- Análises de viabilidade complementares às análises analíticas
- Identificação de possíveis limitações de operação futuras

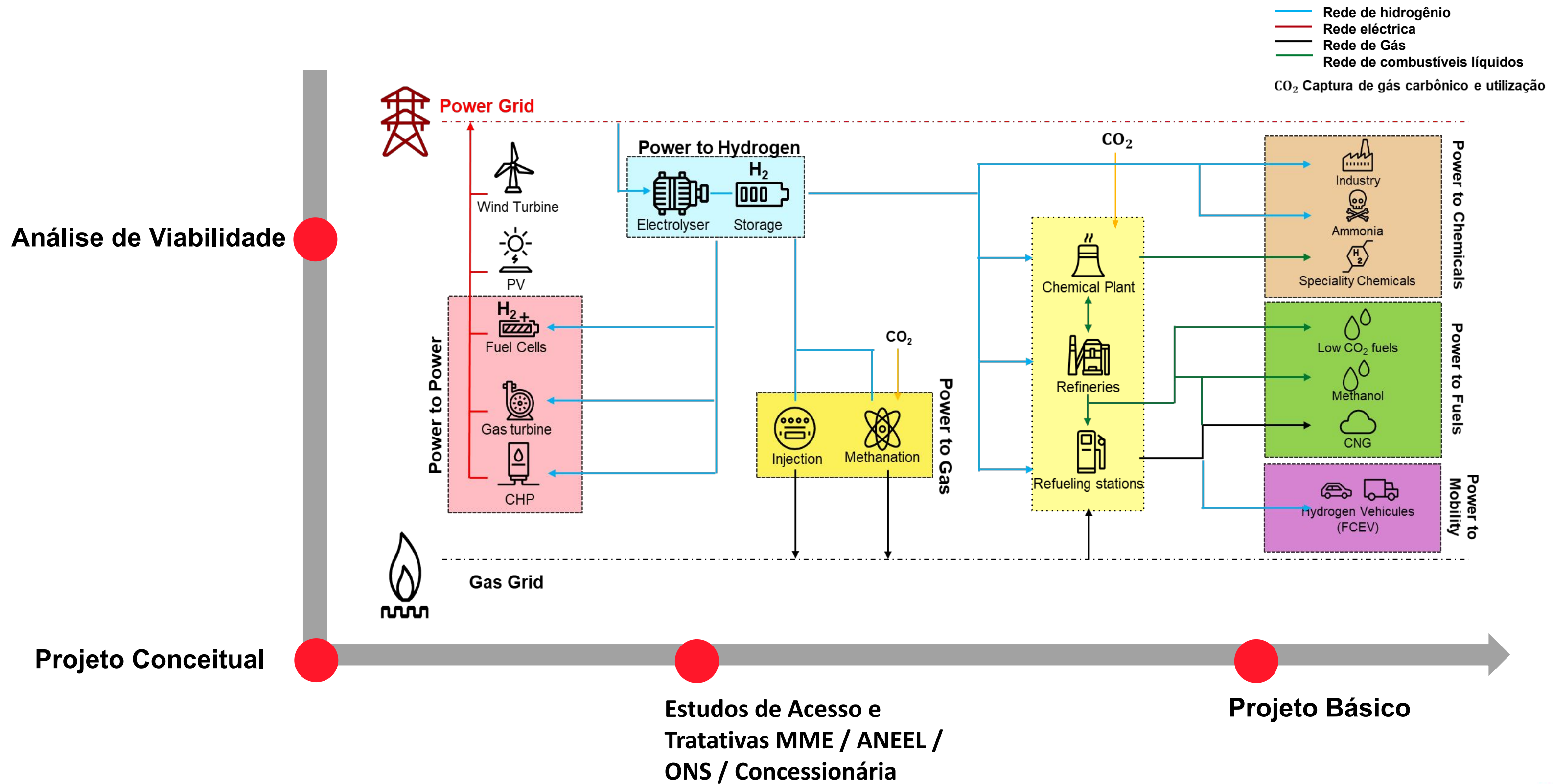
Aspectos Regulatórios

- Suporte junto aos órgãos reguladores do setor elétrico Brasileiro
- Suporte técnico em todas as etapas do processo

Aspectos Econômicos

- Levantamento de custos de implantação aderentes à conjuntura do mercado
- Análises de Viabilidade econômica

Hitachi Energy Power Consulting

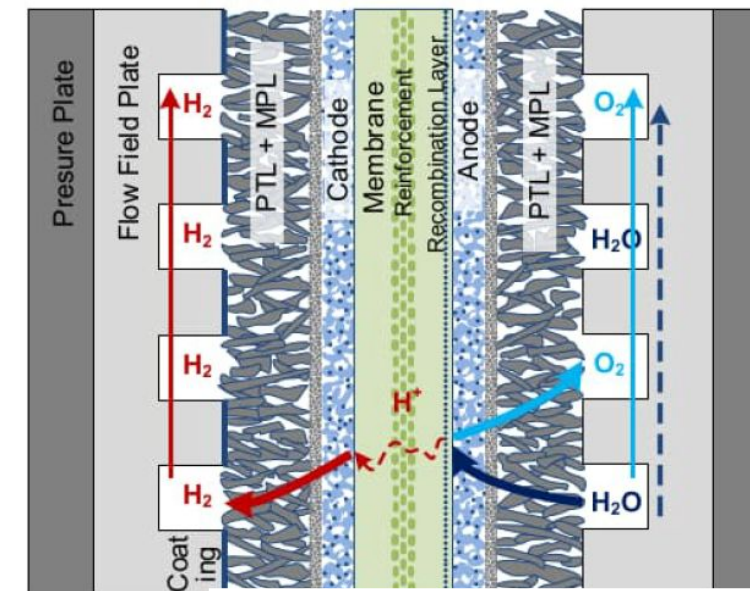


Análise de Viabilidade

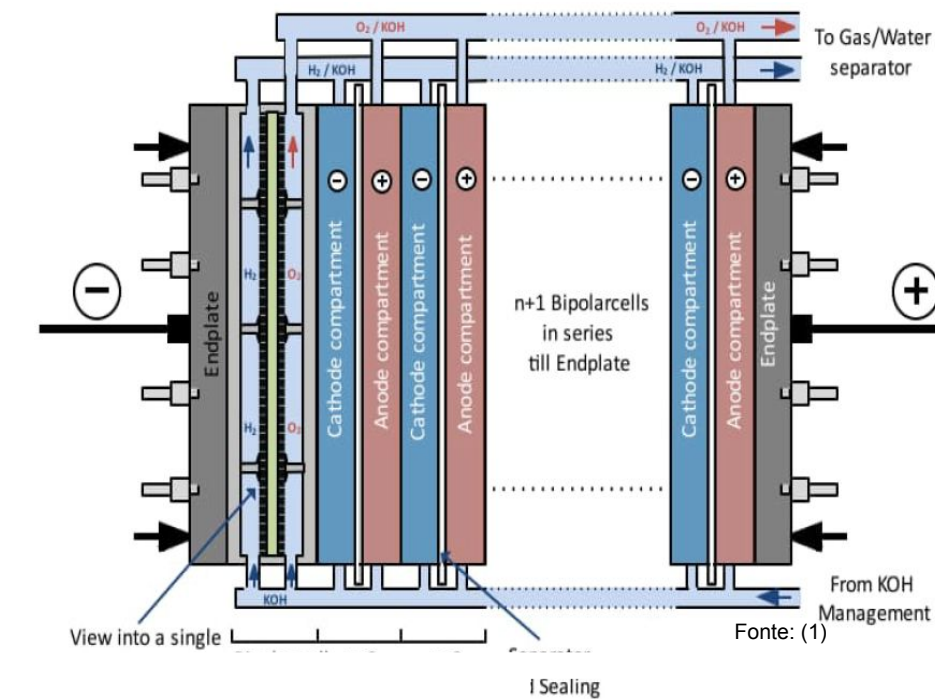
- Análises de mercado e desafios técnicos para o desenvolvimento de soluções P2X
- Tecnologia adequada
- Avaliações de margem de escoamento
- Escolha dos melhores pontos para conexão de uma planta de H2V
- Impacto dos planos de desenvolvimento da rede e da geração
- Avaliação do impacto ambiental – de CO2 para alternativas combinadas
- Demanda de energia elétrica
- Demanda de reagentes



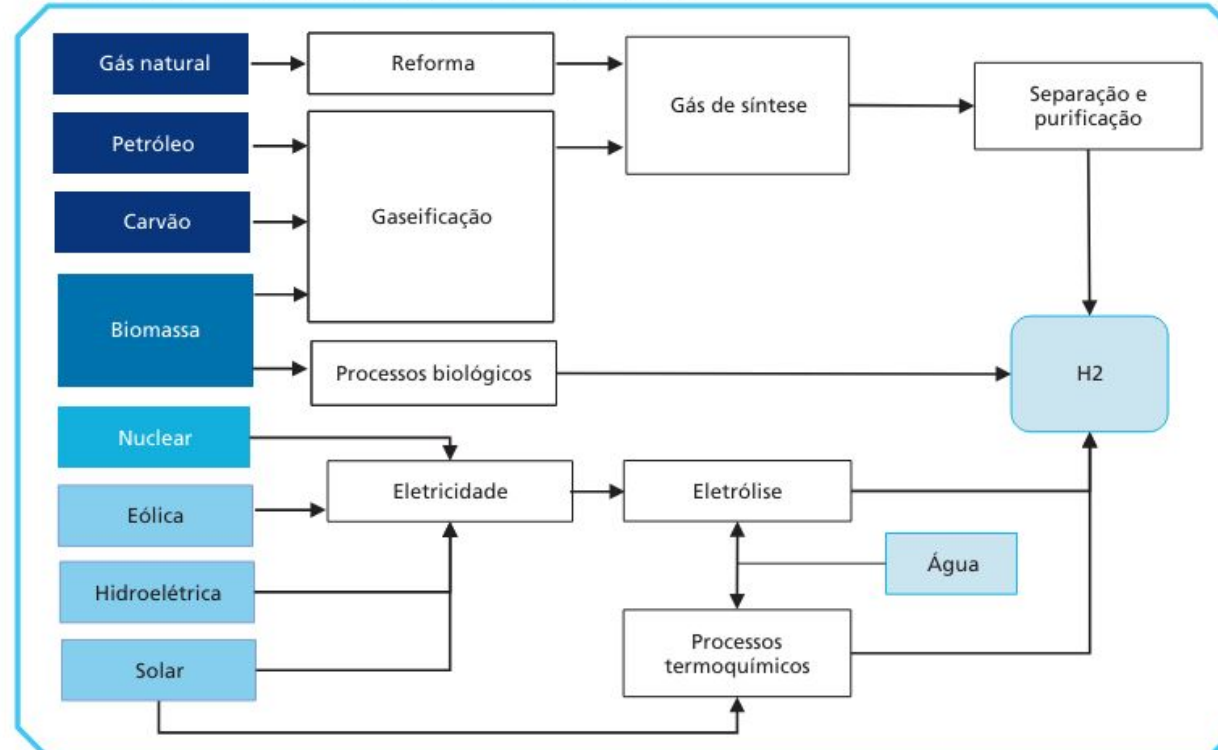
Eletrólizadores por Membrana Polimérica (PEM)



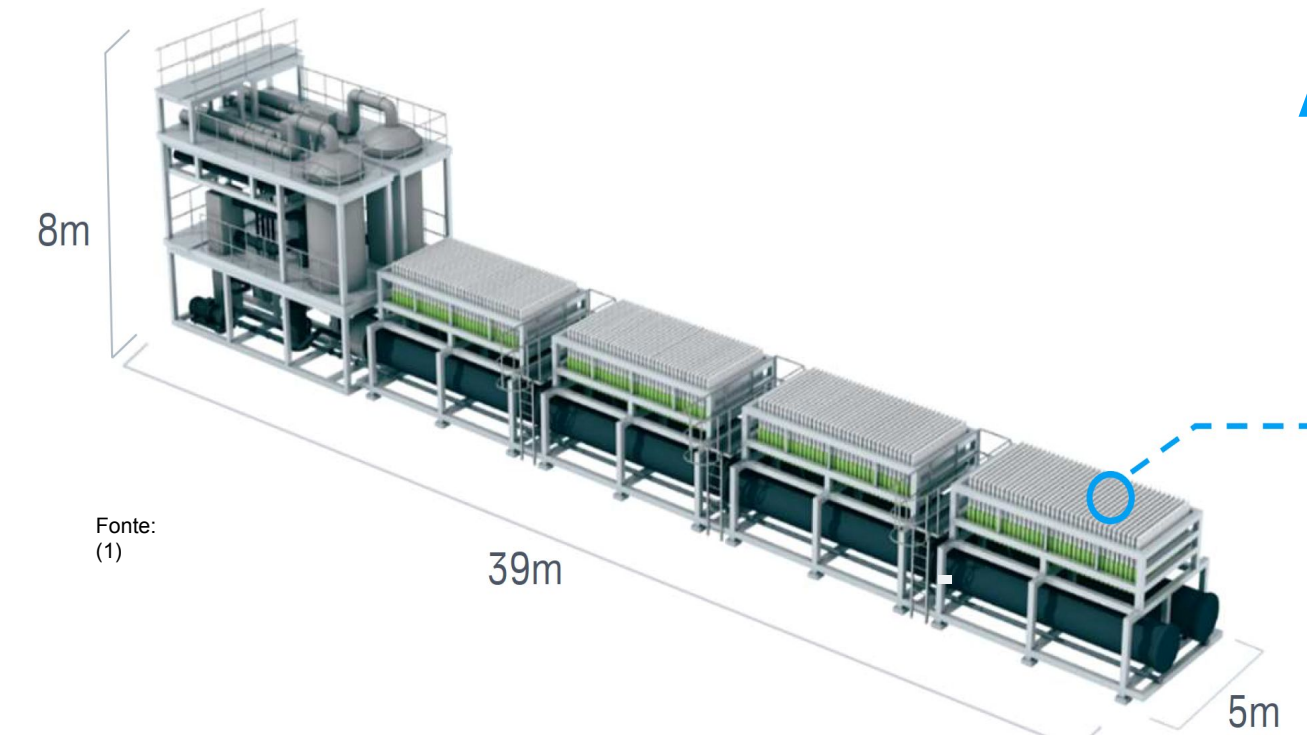
Eletrólizadores Alcalinos (AWE)



Matérias-primas para produção de hidrogênio

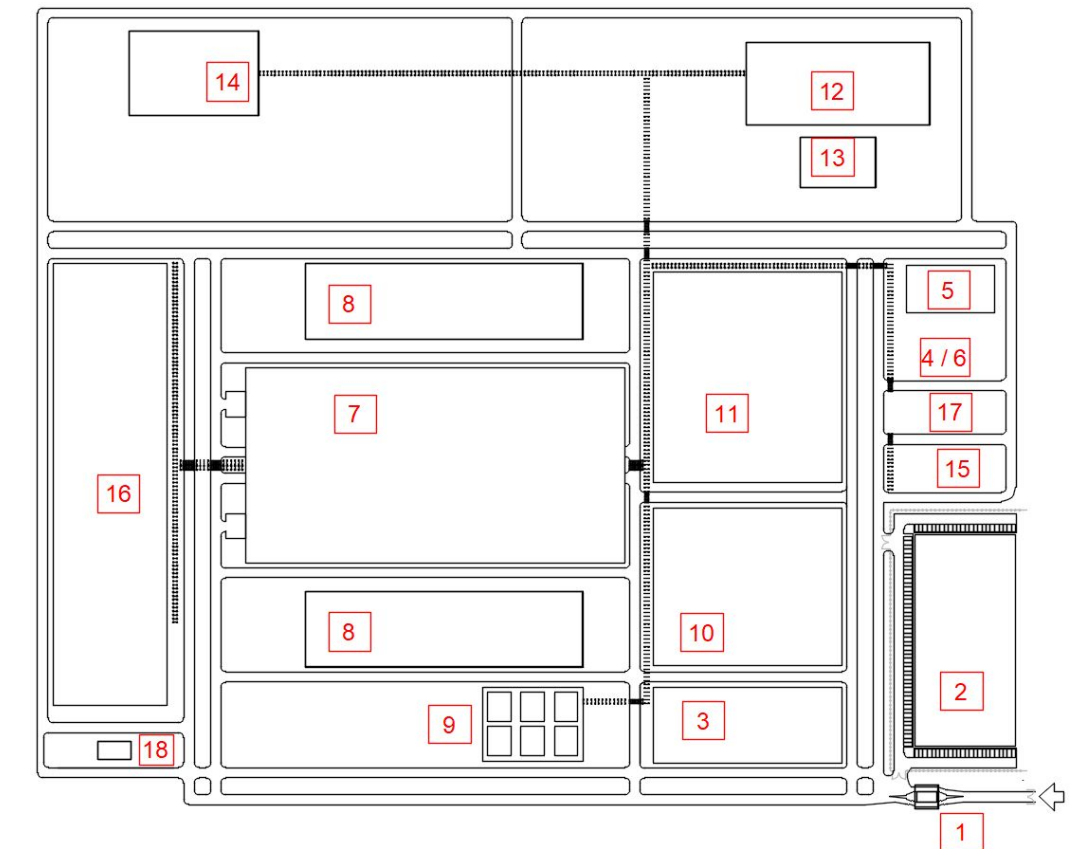
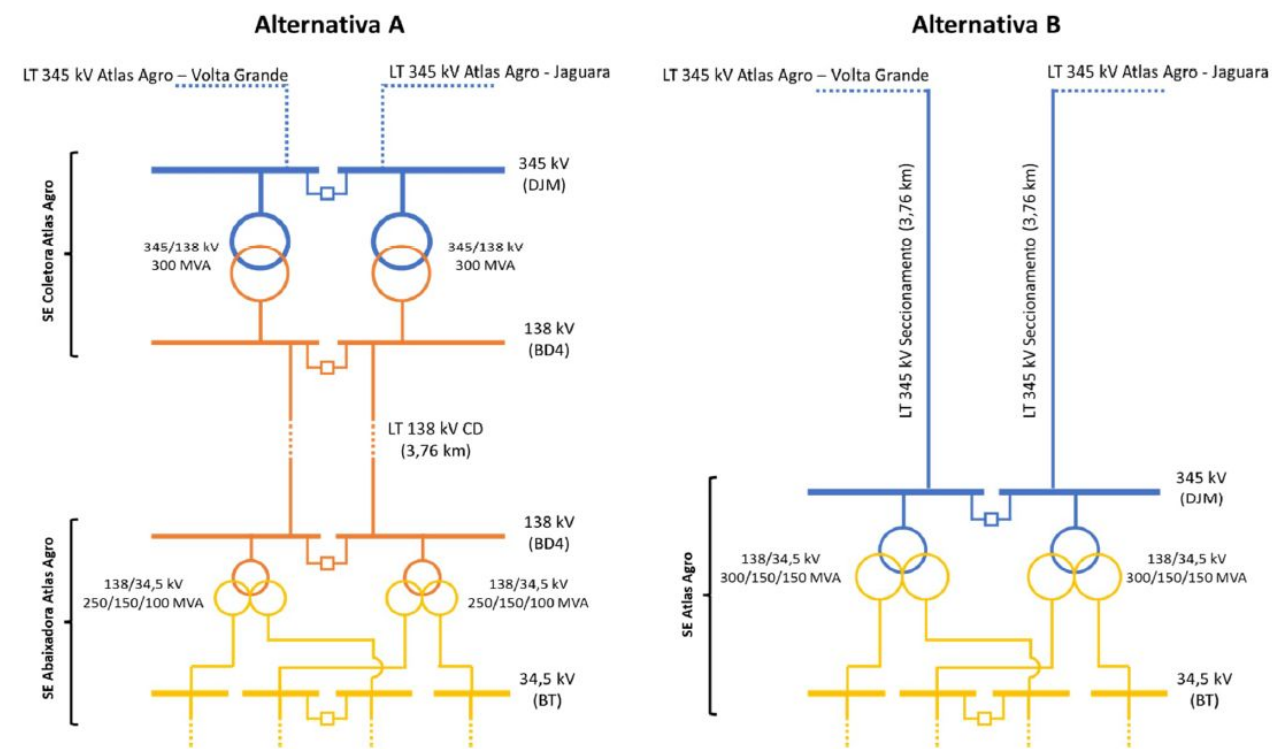


Fonte 1



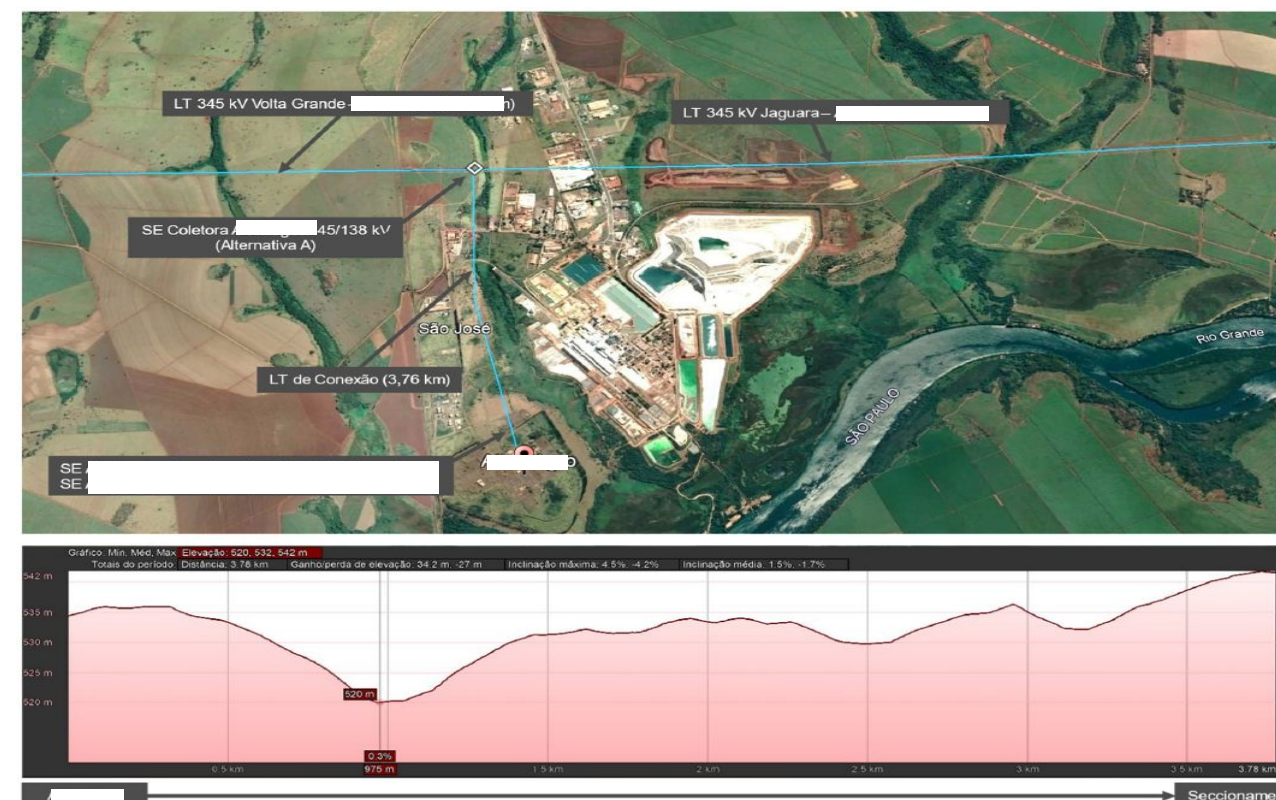
Fonte: (1)

Análise de Viabilidade



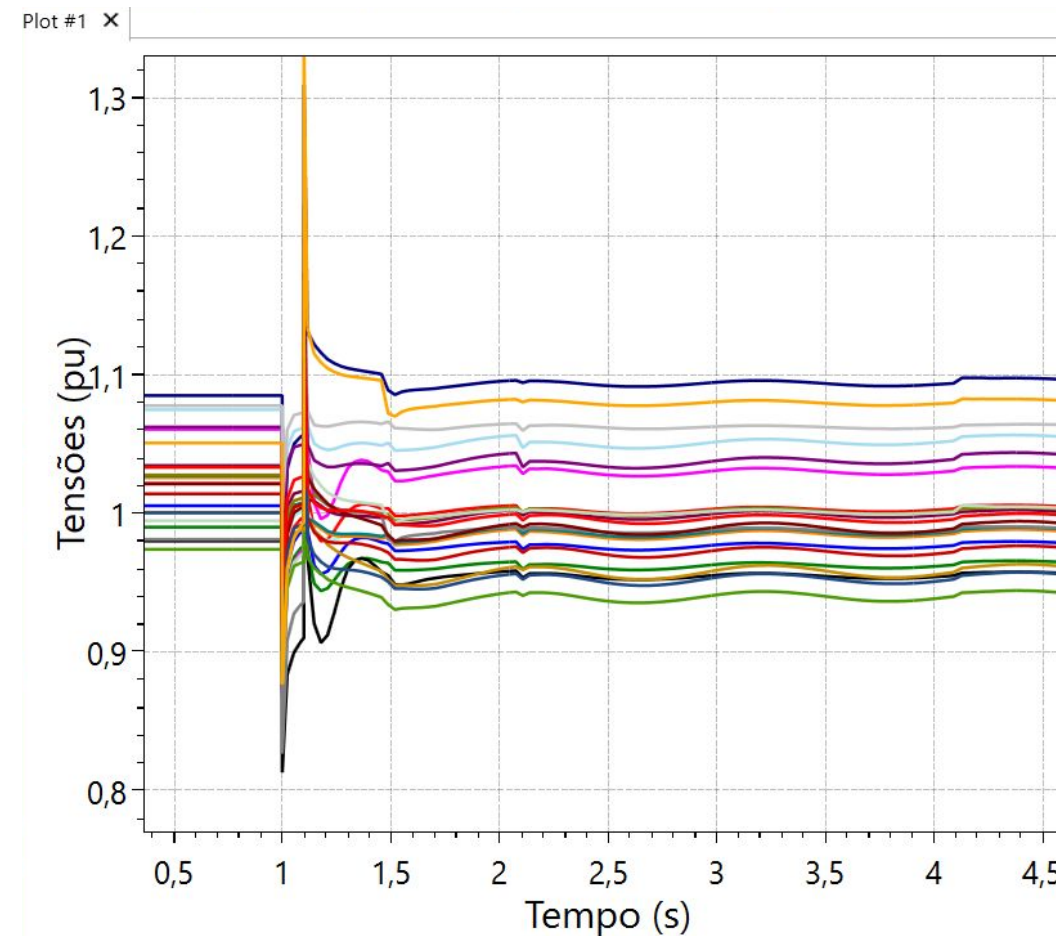
Projeto Conceitual

- Topologia da planta
- Definição da curva de carga
- Definição dos processos
- Estratégia de armazenamento/transporte e aplicações
- Layout da planta
- Lista de Equipamentos
- Otimização tecno-económica da concepção do sistema
- Definição da unidade separação do ar (nitrogênio, etc)
- Definição do reator de combinação do NH₃ – H₂
- Sistema de refrigeração
- Tubulações
- Cabos
- Estimativa CAPEX e OPEX
- Lista de fornecedores

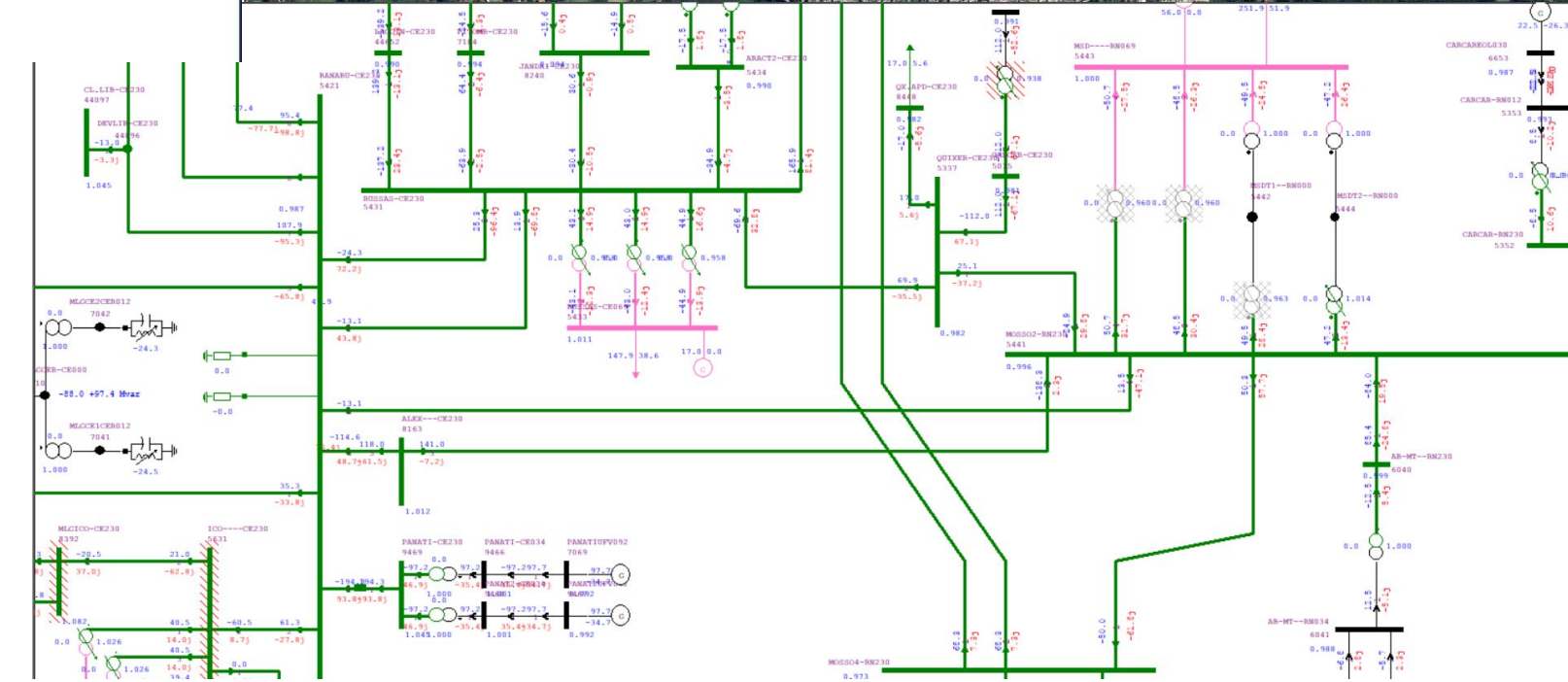
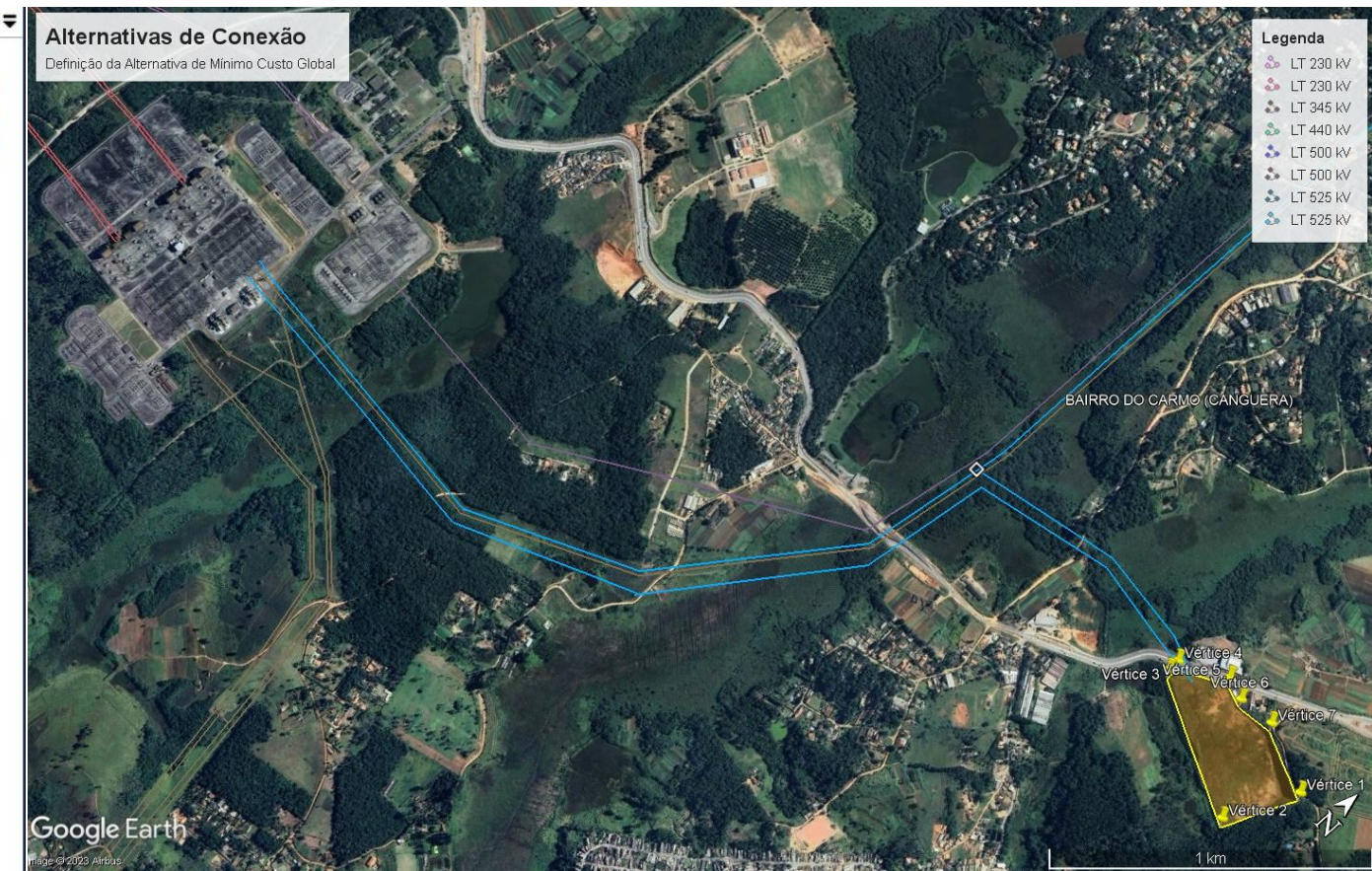


Hitachi Energy Power Consulting

Análise de Viabilidade



VOLT	6071 OURLN-BA230
VOLT	6341 IRECE--BA230
VOLT	6291 M.CHAP-BA230
VOLT	6061 GENDO2-BA230
VOLT	6060 GENDO2-BA500
VOLT	6075 BURITI-BA500
VOLT	6360 BARREI-BA500
VOLT	6080 BRREC5CAP500
VOLT	6443 R.EGUA-BA500
VOLT	6444 R.EGUA-BA500
VOLT	6358 BJLAP2-BA230
VOLT	6171 IGAPOR-BA230
VOLT	6220 IGAPOR-BA500
VOLT	6500 JUAZEI-BA500
VOLT	6300 SOBRAD-BA500
VOLT	5050 L.GONZ-PE500
VOLT	6359 IBICOA-BA500
VOLT	5861 POCOES-BA230
VOLT	5860 POCIII-BA500
VOLT	5752 CAMAC4-BA500
VOLT	6369 SAPEAC-BA500
VOLT	5740 OLINDI-BA500
VOLT	6349 BJLAP2-BA500

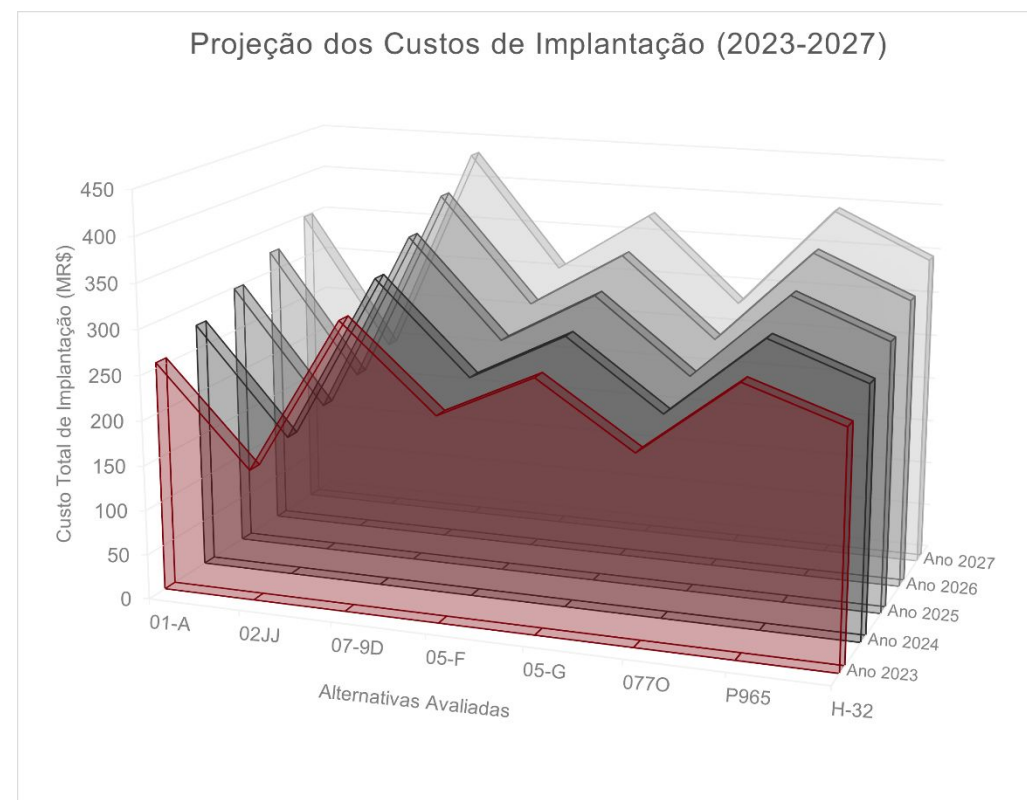
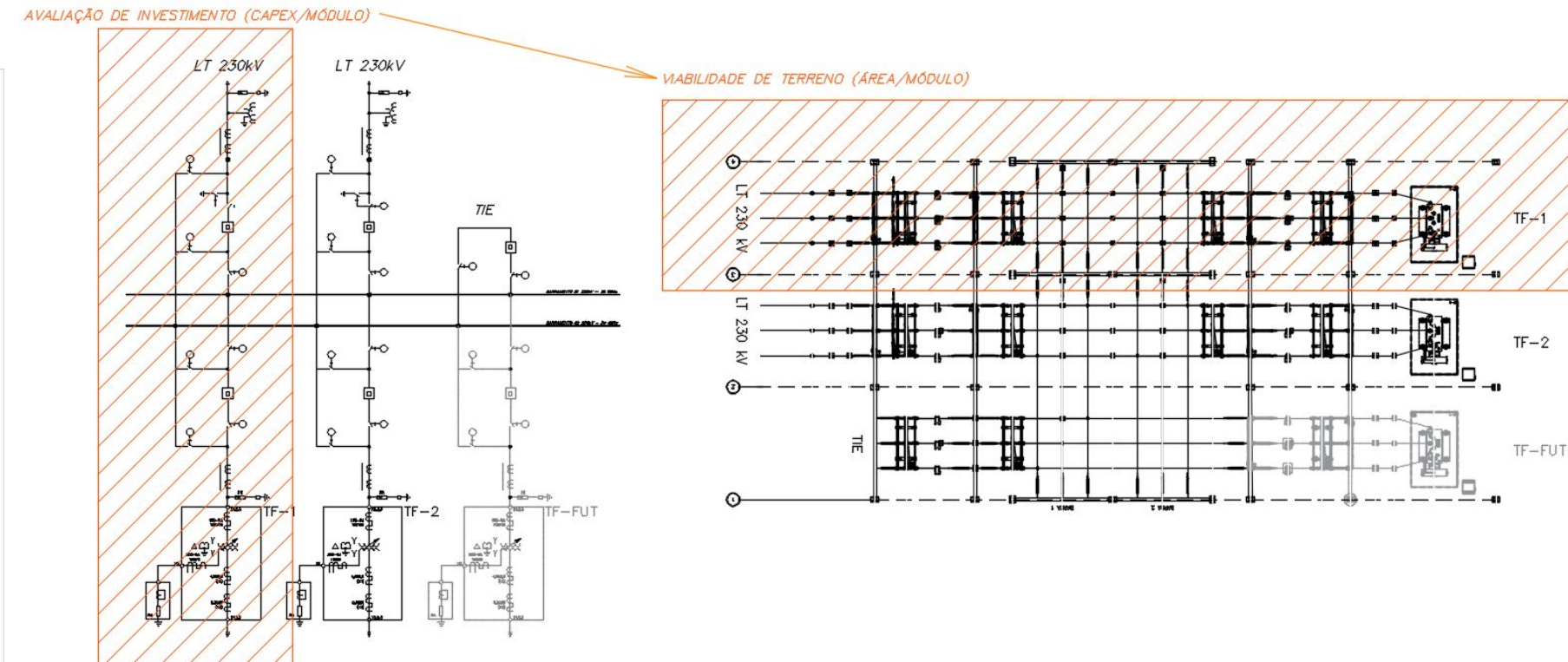
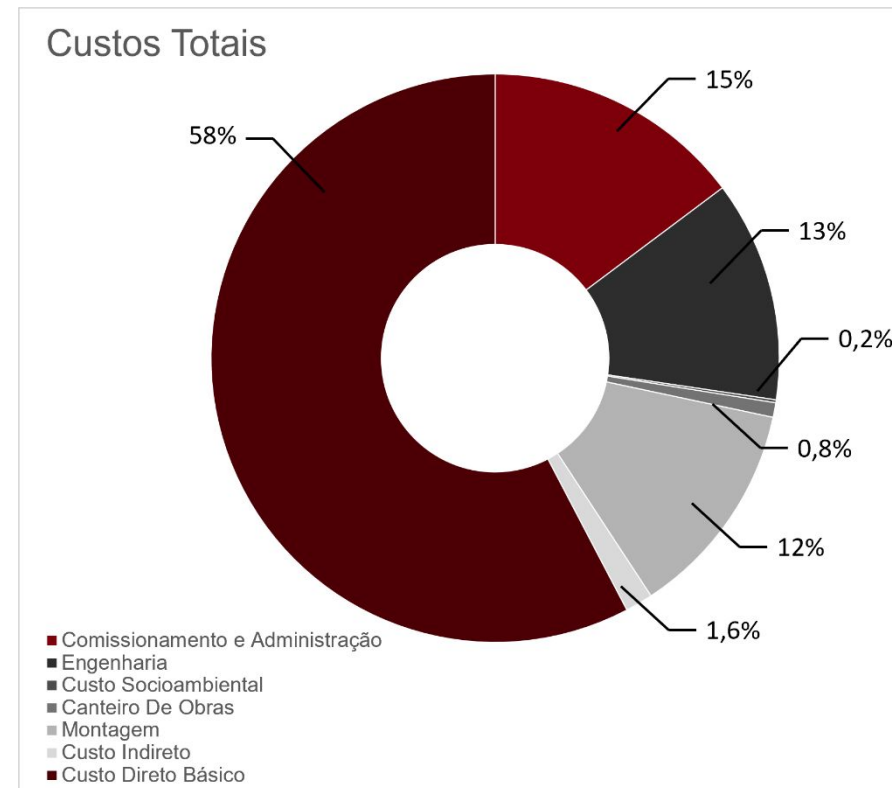


Projeto Conceitual

- Topologia da planta
- Definição da curva de carga
- Definição dos processos
- Estratégia de armazenamento/transporte e aplicações
- Layout da planta
- Lista de Equipamentos
- Otimização tecno-económica da concepção do sistema
- Definição da unidade separação do ar (nitrogênio, etc)
- Definição do reator de combinação do NH₃ – H₂
- Sistema de refrigeração
- Tubulações
- Cabos
- Estimativa CAPEX e OPEX
- Lista de fornecedores

Hitachi Energy Power Consulting

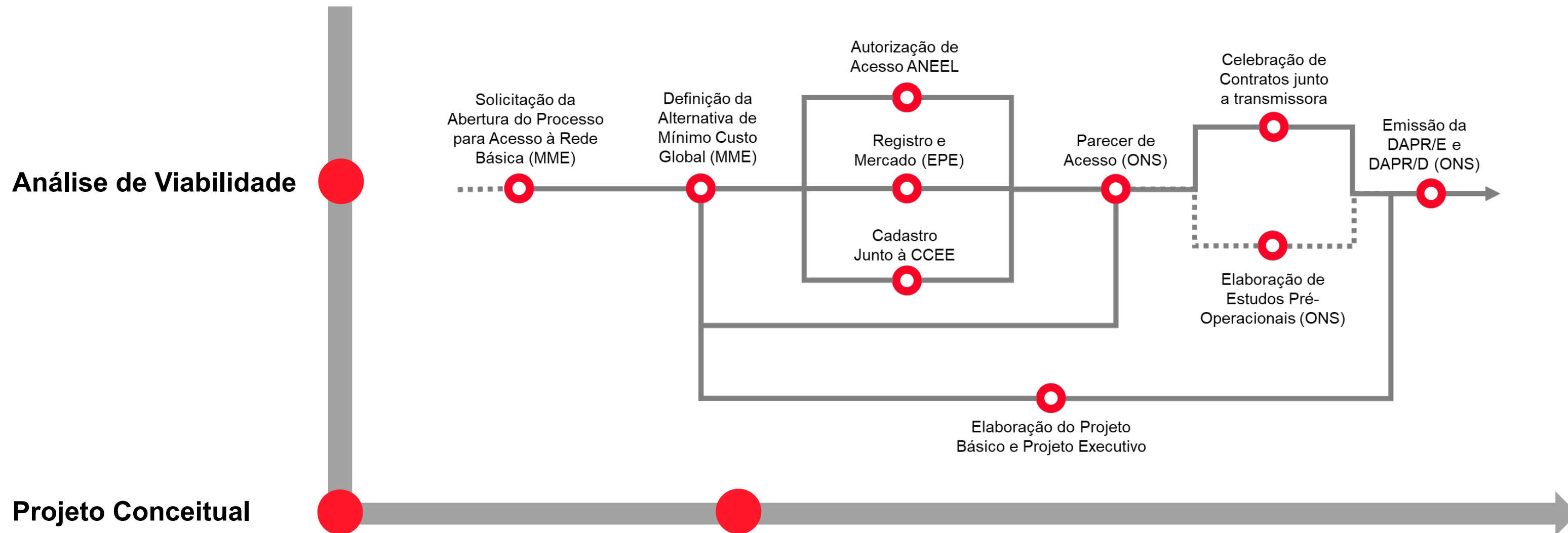
Análise de Viabilidade



Alternativa	Transformadores	LT	Confiabilidade	Flexibilidade	Custo	Área
1	1 trifásico 230/34,5 kV	230 kV CD	Mínima	Baixa	Mínimo	Mínima
2	2 trifásicos 230/34,5 kV	230 kV CD	Alta	Alta	Alto	Média
3	1 monofásico + Reserva 500/34,5 kV	500 kV CS	Muito Alta	Alta	Muito Alto	Alta
4	2 monofásicos + Reserva 500/34,5 kV	500 kV CD	Máxima	Muito Alta	Máximo	Máxima

Projeto Conceitual

- Topologia da planta
- Definição da curva de carga
- Definição dos processos
- Estratégia de armazenamento/transporte e aplicações
- Layout da planta
- Lista de Equipamentos
- Otimização tecno-económica da concepção do sistema
- Definição da unidade separação do ar (nitrogênio, etc)
- Definição do reator de combinação do NH3 – H2
- Sistema de refrigeração
- Tubulações
- Cabos
- Estimativa CAPEX e OPEX
- Lista de fornecedores



Estudos de Acesso e Tratativas MME / ANEEL / ONS / Concessionária

- Tratativas e Estudos junto ao MME
- Estudos de Parecer de acesso
- Análises sistêmica e planejamento do melhor ano de entrada
- Lista de Equipamentos

Análise de Viabilidade

- Análises de mercado e desafios técnicos para o desenvolvimento de soluções P2X
- Tecnologia adequada
- Avaliações de margem de escoamento
- Escolha dos melhores pontos para conexão de uma planta de H2V
- Impacto dos planos de desenvolvimento da rede e da geração
- Avaliação do impacto ambiental – de CO2 para alternativas combinadas
- Demanda de energia elétrica
- Demanda de reagentes

Projeto Conceitual

- Topologia da planta
- Definição da curva de carga
- Definição dos processos
- Estratégia de armazenamento/transporte e aplicações
- Layout da planta
- Lista de Equipamentos
- Otimização tecno-económica da concepção do sistema

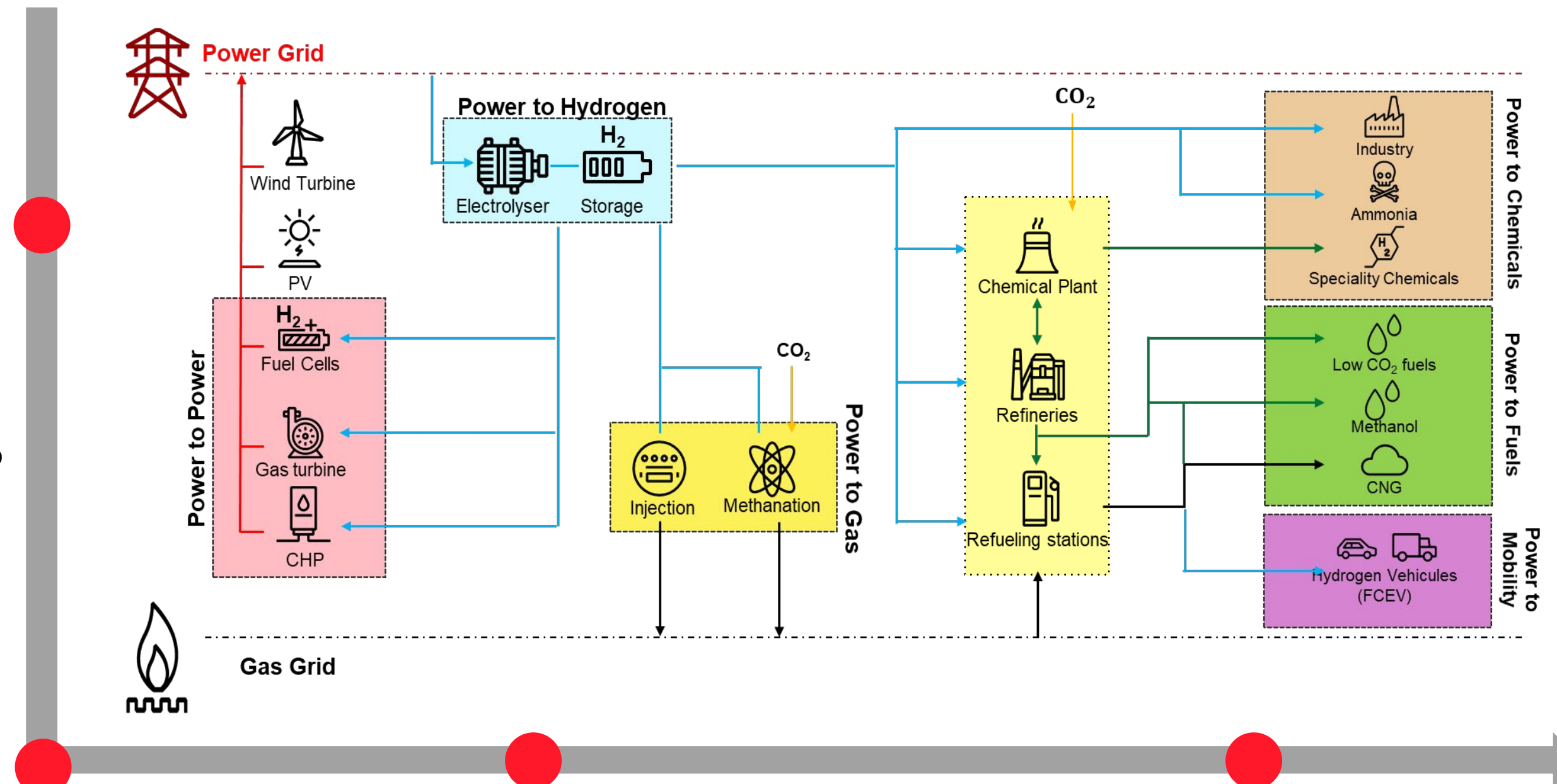
- Definição da unidade separação do ar (nitrogênio, etc)
- Definição do reator de combinação do NH3 – H2
- Sistema de refrigeração
- Tubulações
- Cabos
- Estimativa CAPEX e OPEX
- Lista de fornecedores

Estudos de Acesso e Tratativas MME / ANEEL / ONS / Concessionária

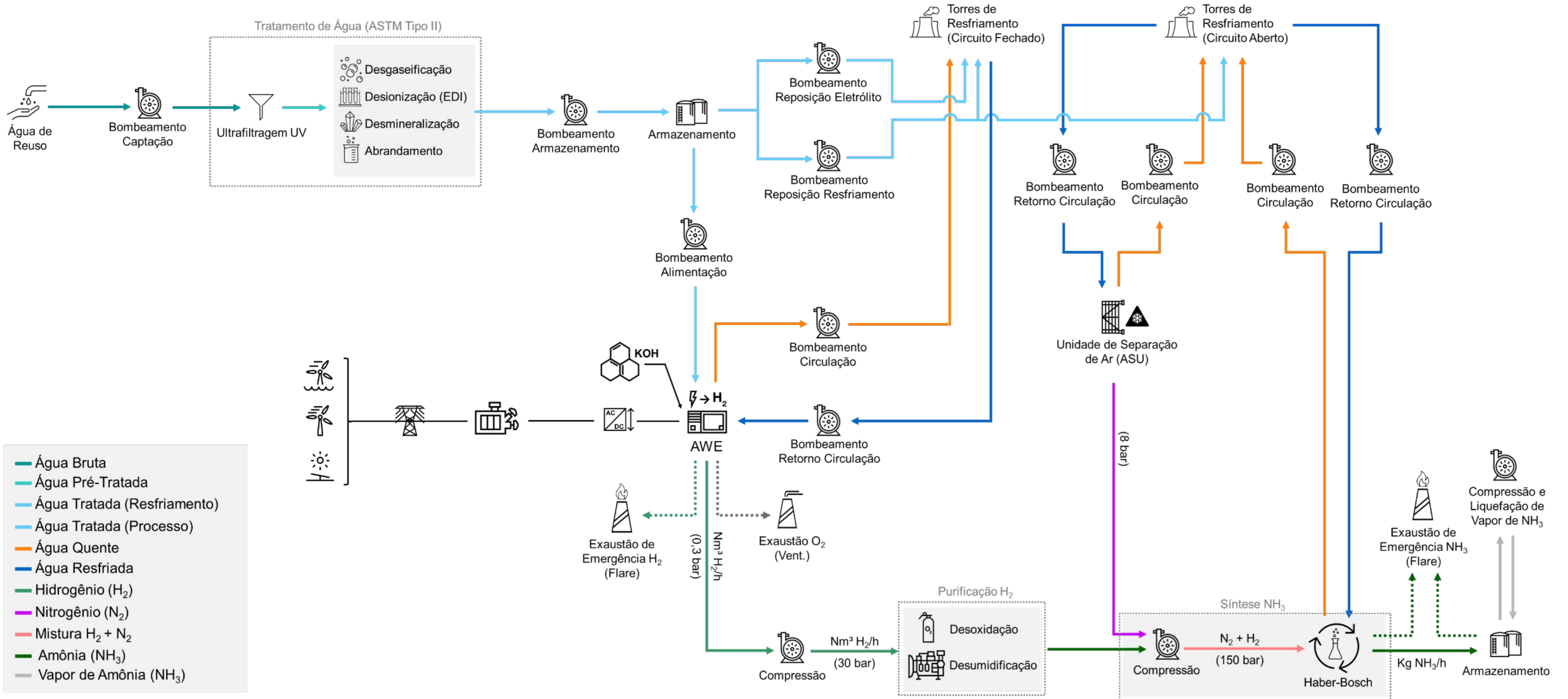
- Tratativas e Estudos junto ao MME
- Estudos de Parecer de acesso
- Análises sistêmica e planejamento do melhor ano de entrada
- Lista de Equipamentos

Projeto Básico

- Projeto básico da planta (civil, elétrico e eletromecânico)
- Dimensionamento final de equipamentos
- Estudos de Transitório Eletromagnético
- Estudos de Coordenação de Isolamento
- Estudos de Pré-operacional (Energização de transformadores)
- Estudos de Proteção e Seletividade
- Estudos de Aterramento
- Engenharia do proprietário

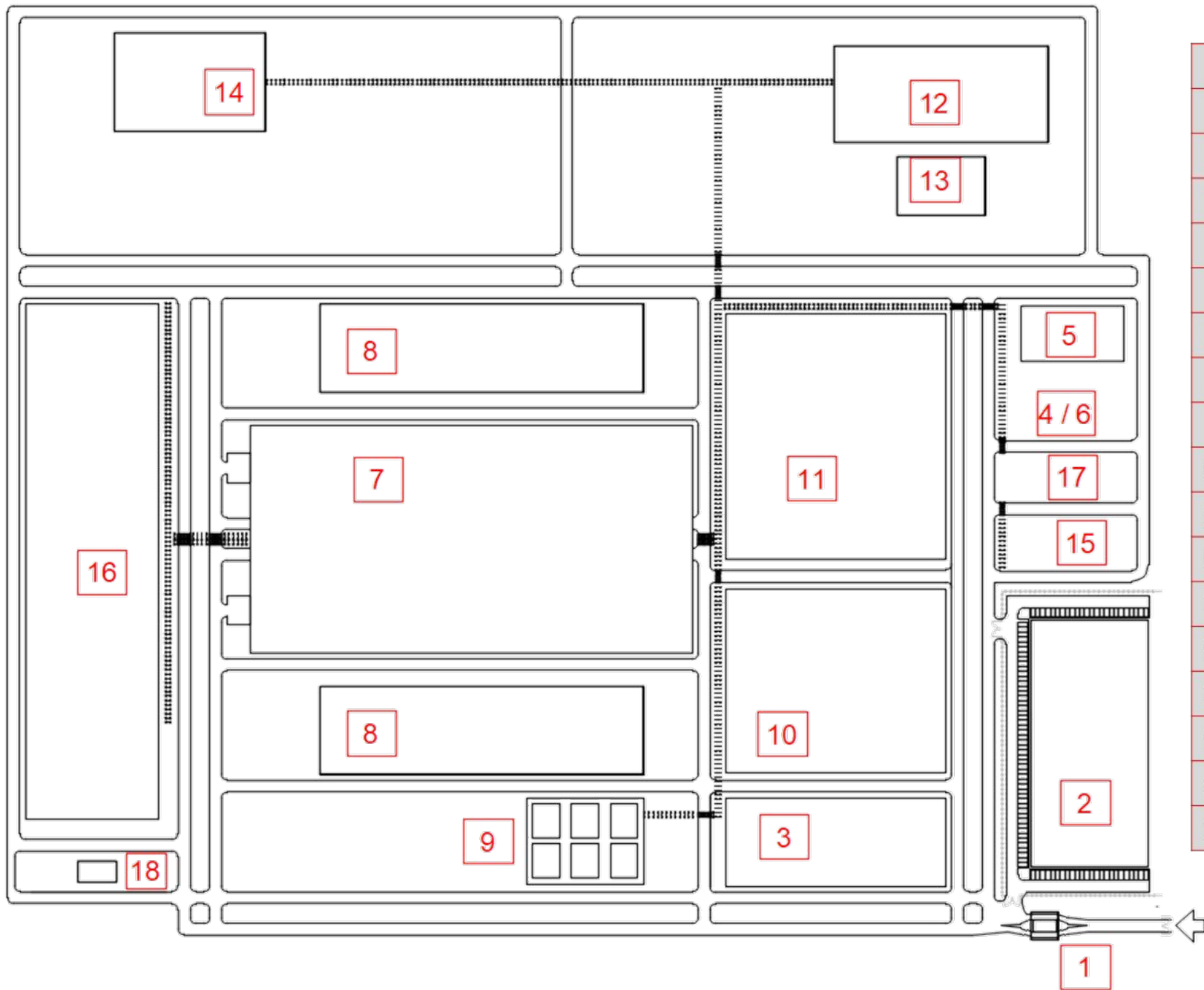


Hitachi Energy Power Consulting

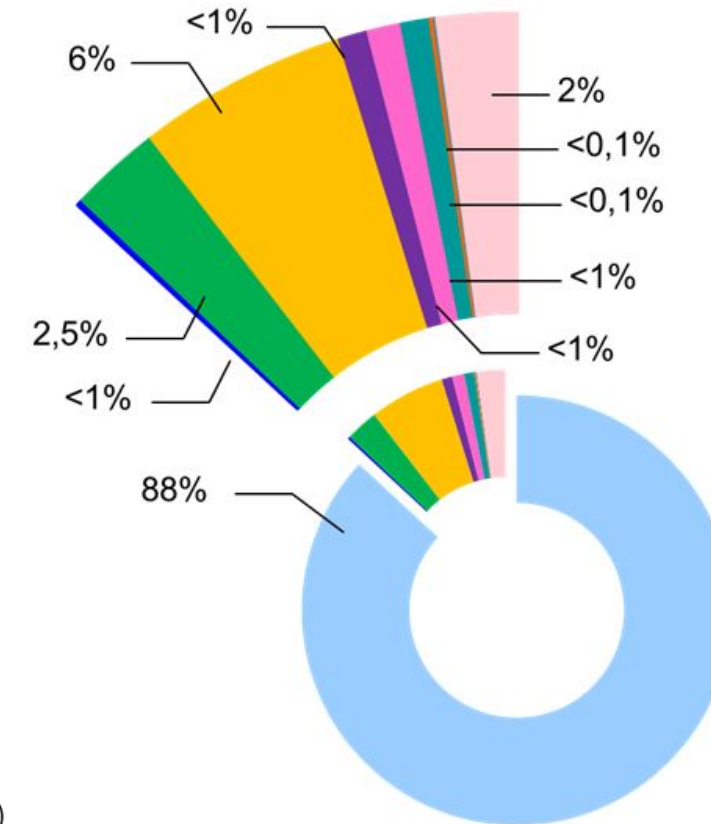


- Água Bruta
- Água Pré-Tratada
- Água Tratada (Resfriamento)
- Água Tratada (Processo)
- Água Quente
- Água Resfriada
- Hidrogênio (H₂)
- Nitrogênio (N₂)
- Mistura H₂ + N₂
- Amônia (NH₃)
- Vapor de Amônia (NH₃)

Hitachi Energy Power Consulting



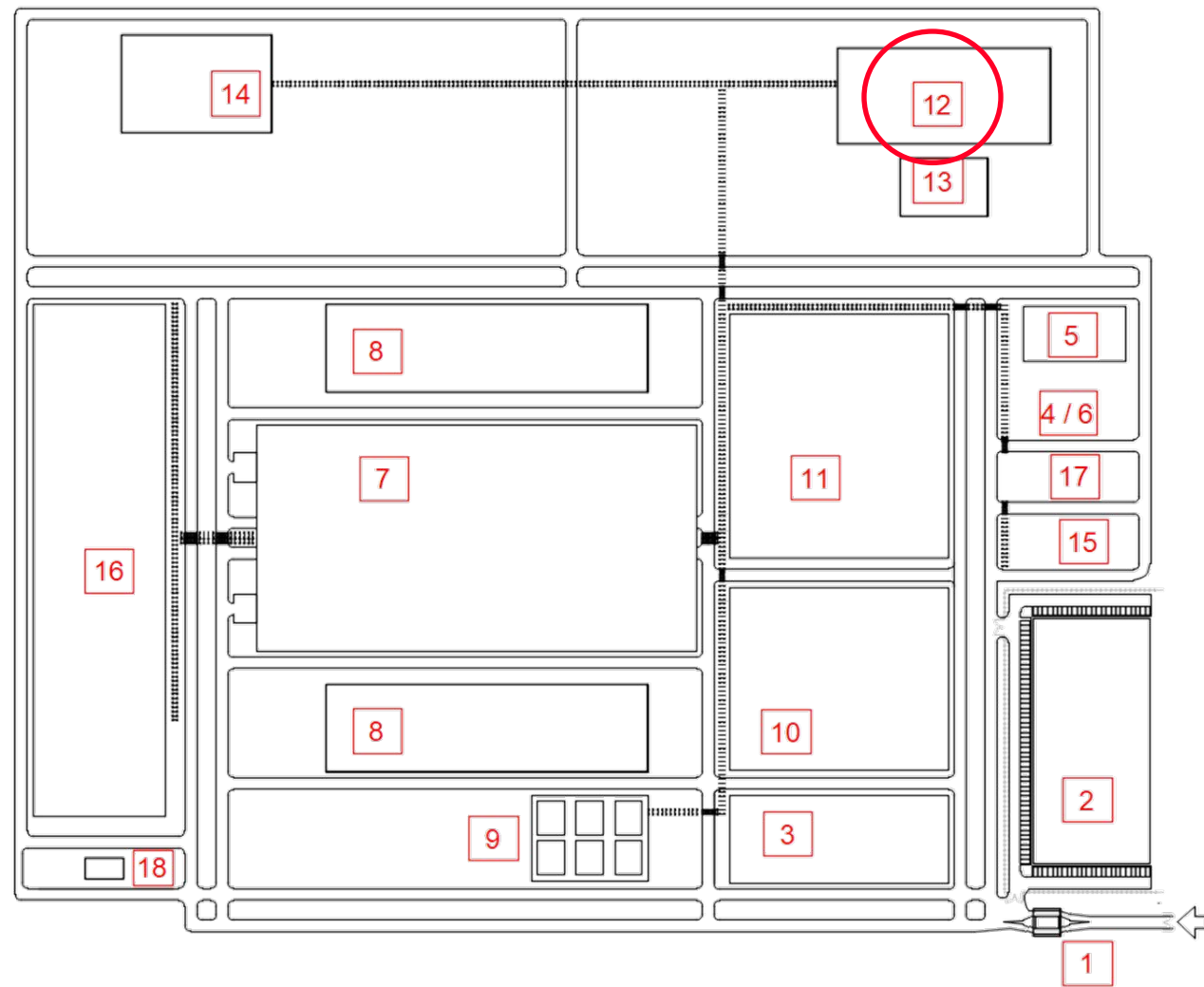
- 1 Plant Entrance Area
- 2 Administrative Buildin/Control Room
- 3 Transformers (SS)/Electrical Room
- 4 Raw Water Tank
- 5 Desmineralized Water Treatment
- 6 Desmineralized Water Tank
- 7 Electrolysis Build (250 MW)
- 8 Transf./Elec. Room H2 Syst.
- 9 H2 Compression System
- 10 Air Separation Unit (ASU)
- 11 Ammonia Plant (Haber-Bosch)
- 12 Ammonia Storage
- 13 Boil-off Gas Recov. Syst. (BOG)
- 14 Flare System
- 15 Fire Fighting System (Tank and Pumps)
- 16 Cooling System (Fan Coolers)
- 17 Instrument Air and Plant Air
- 18 Wastewater Treatment



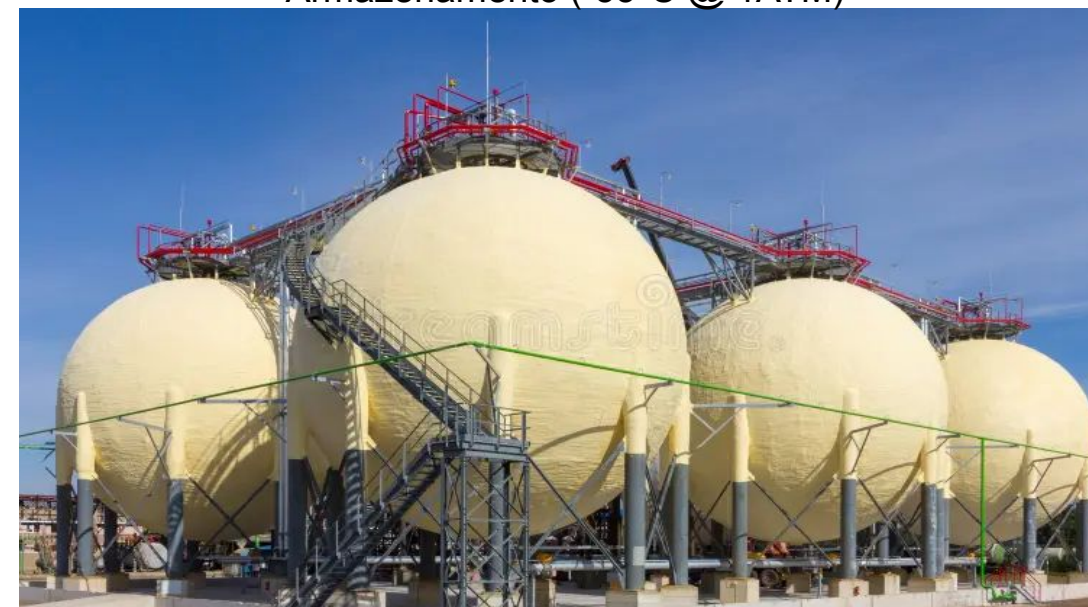
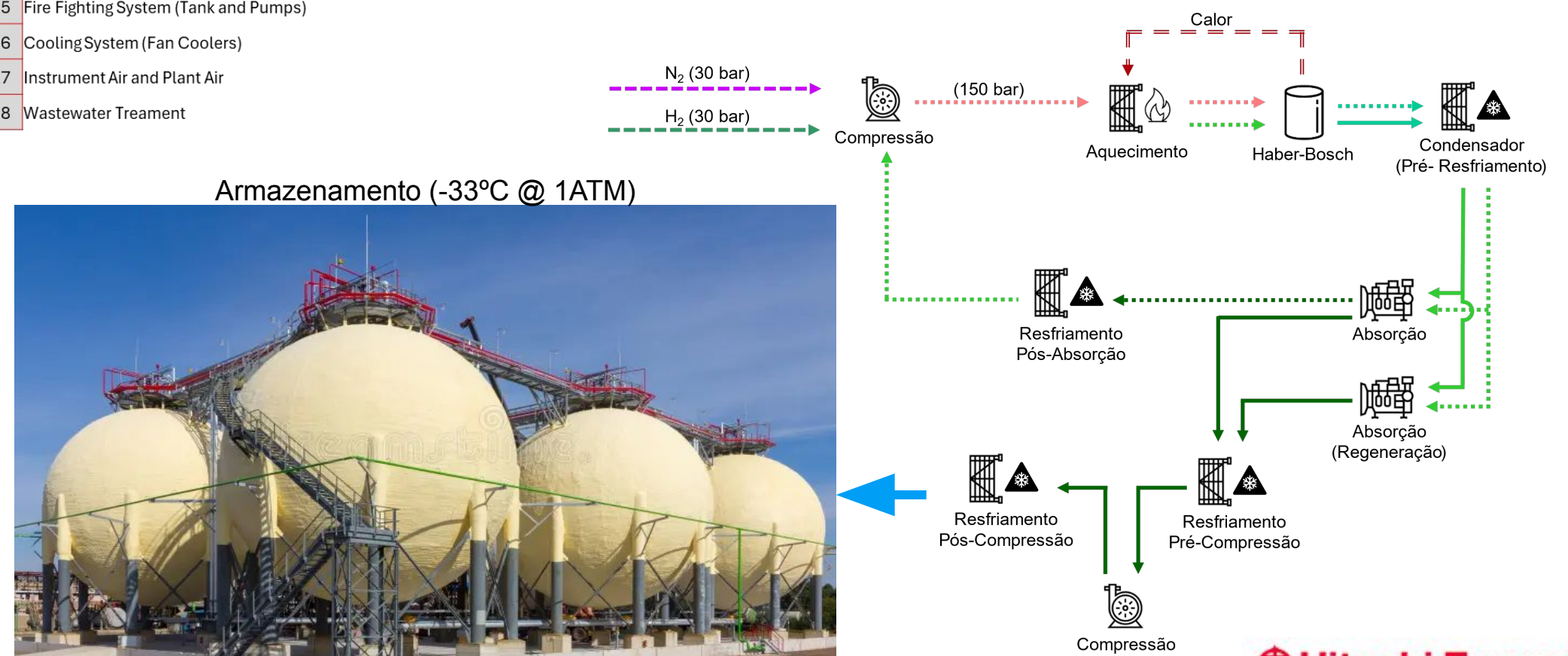
Consumo de H2 (kg/h)	18,000.00
Consumo de N2 (kg/h)	83,000.00
Produção de NH3V (kg/h)	100,00
Consumo Água Tratada (kg/h)	195,000.00
Produção de H2 (kg/h)	18,000.00

- Eletrolise
- Purificação de Hidrogênio
- Compressão de Hidrogênio
- Síntese de Amônia
- Unidade de Separação de Ar (ASU)
- Sistema de Resfriamento
- Tratamento de Água
- Serviços Auxiliares Subestação
- Serviços Auxiliares Área Industrial
- Perdas Elétricas

Hitachi Energy Power Consulting



- 1 Plant Entrance Area
- 2 Administrative Buildin/Control Room
- 3 Transformers (SS)/Electrical Room
- 4 Raw Water Tank
- 5 Desmineralized Water Treatment
- 6 Desmineralized Water Tank
- 7 Electrolysis Build (250 MW)
- 8 Transf./Elec. Room H2 Syst.
- 9 H2 Compression System
- 10 Air Separation Unit (ASU)
- 11 Ammonia Plant (Haber-Bosch)
- 12 Ammonia Storage
- 13 Boil-off Gas Recov.Syst. (BOG)
- 14 Flare System
- 15 Fire Fighting System (Tank and Pumps)
- 16 Cooling System (Fan Coolers)
- 17 Instrument Air and Plant Air
- 18 Wastewater Treatment



Fonte:



I SEMINÁRIO NACIONAL
DE HIDROGÊNIO
VERDE SENAHIDRO
Ciência, Mercado e Tendências



ESCOLA DA
ENERGIA

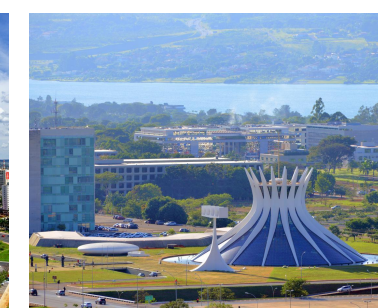
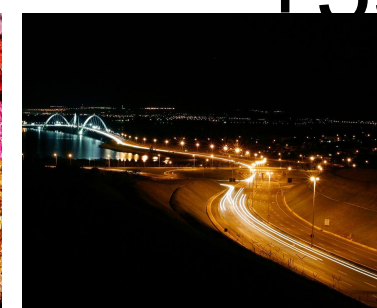
Luís Meca e Rodolfo Rosa
Hitachi Energy Brasil

luis.meca@hitachienergy.com

rodolfo.rosa@hitachienergy.com

+55 11 96333-2048

+55 11 94726-5956



BENCHMARKING INTERNACIONAL RELACIONADO ÀS LEGISLAÇÕES E REGULACÕES DO USO DO HIDROGÊNIO PARA MOBILIDADE

Robson do Carmelo Santos Barreiros¹, Sayonara Andrade Eliziário^{1,2}, Marta Célia Dantas^{1,2}, Flávio Wilson Barreiros Oliveira¹, Mirna Dimenstein¹, Priscilla Bernardo Mendonça Barreiros¹, Bruno Nunes Guedes^{1,3}.

¹Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação / robson.carmelo@iati.org.br / flavio.oliveira@iati.org.br / mirnadimenstein@hotmail.com / pmendonca01@hotmail.com

²Universidade de Federal da Paraíba - UFPB / Campus João Pessoa - PB / marta.cds@cear.ufpb.br / sayonara@cear.ufpb.br

³Universidade de Pernambuco - UPE / Campus Salgueiro / bruno.guedes@upe.br

Resumo

O Brasil tem potencial para produção de hidrogênio, podendo atender a demanda em países da Europa e Ásia. A literatura reporta que os setores para aplicação do hidrogênio, são a indústria e a mobilidade. O uso do hidrogênio na mobilidade, para veículos pesados, tem sido estimulado em países como a Alemanha, Austrália e Chile. A pesquisa incluiu várias fontes de busca de dados, para fins de triangulação e corroboração dos dados. O levantamento bibliográfico nas plataformas digitais, considerou as fontes de dados secundárias e artigos publicados nas plataformas Scopus e Web of Science sobre informações da economia e desenvolvimento do hidrogênio. No contexto Power to Mobility, para formação de um ecossistema adequado é necessário ter políticas de incentivo para o setor de eletromobilidade, veículos estratégicos para o país e infraestrutura de abastecimento. A análise de iniciativas dos países que implantaram políticas e estratégias que favorecem a experiência no mercado de elétricos e FCEVs, foi possível analisar que o continente Asiático, a América do Norte, Europa e Oceania, são as melhores regiões para avaliar as experiências internacionais relacionadas as políticas públicas para o uso do hidrogênio na mobilidade. Observou-se que no Brasil ainda há lacunas na regulação do hidrogênio na produção, armazenamento e uso. O mercado de veículos elétricos e FCEVs, está relacionado ao desenvolvimento de políticas públicas, pois veículos movidos a hidrogênio possuem tecnologia emergente, e as iniciativas governamentais de incentivos são formas de sugerir caminhos para estabelecer critérios nacionais claros e analisar possíveis possibilidades na mobilidade elétrica no Brasil.

Palavras-chave: hidrogênio; energia renovável; regulação do hidrogênio; hidrogênio verde; políticas públicas, infraestrutura; eletromobilidade.

1. Introdução

Na perspectiva de uso direto em célula a combustível, o setor ocupa uma posição de maturidade elevada. Em junho de 2021, mais de 40.000 FCEVs estavam em circulação em todo o mundo, com quase 90% deles na Coreia, Estados Unidos, República Popular da China e Japão.

Assim, os governos e outros stakeholders passaram a se esforçar em desenvolver políticas públicas e projetos para incentivar o uso do hidrogênio na mobilidade. Algumas iniciativas de países pelo mundo, concentradas em políticas de incentivo e mecanismos financeiros, demonstram que a tomada de decisão de forma adequada pode influenciar o comportamento do mercado de transportes e incentivar consumidores. Os países com maiores emissões de GEE, impactam também nos números elevados de suas regiões, e têm se empenhado em desenvolver políticas mais expressivas na tentativa de exercer um impacto sobre esses dados, através do setor de mobilidade.

Em consonância, as regiões que mais se empenharam para desenvolver políticas públicas para o uso do hidrogênio na mobilidade foram os mesmos que obtiveram resultados no mercado. Pode-se citar as regiões e países: América do Norte, representada principalmente pelos Estados Unidos; União Europeia, representada pela Alemanha e Reino Unido; Ásia, representada pelo Japão, Coreia do Sul e China (Power Technology Research, 2023). O desenvolvimento deste setor, notadamente se relaciona com o desenvolvimento de políticas públicas e de um arcabouço regulatório direcionado, capazes de alavancar tecnologias disruptivas que muitas vezes ainda não possuem maturidade mercadológica.

Pode-se destacar que as aplicações do hidrogênio nos transportes são possíveis, não apenas com utilização de células a combustível, mas também com a utilização de motores de combustão interna (ICE) ou turbinas, ou ainda de forma inovadora, através do uso de etanol para produção de hidrogênio por reforma a vapor em uma célula de óxido sólido. Logo, evidencia-se o desenvolvimento desse mercado que envolve: políticas governamentais, arcabouço regulatório adequado e atualizado, inserção de infraestruturas de abastecimento, projetos P&D, análises de impacto econômico, ambiental e potencialidades tecnológicas.

2. Metodologia

A busca das experiências internacionais foi realizada a partir de relatórios internacionais de agências como a IEA e IRENA, sites governamentais e de divulgação aberta, que incluiu várias fontes de busca de dados, para fins de triangulação e corroboração dos dados. Fez-se o levantamento bibliográfico nas plataformas digitais, considerando as fontes de dados secundárias e artigos publicados nas plataformas Scopus e Web of Science sobre informações da economia e desenvolvimento do hidrogênio.

3. Tópicos abordados na literatura

Para entender as lacunas da pesquisa e sugerir ações para implementação de estratégias sobre a mobilidade, fez-se um breve estudo dos países que investem neste setor.

3.1. Canadá

O Governo do Canadá anunciou US\$ 547,5 milhões em financiamento ao longo de quatro anos (ou até que o financiamento disponível se esgote) para o Programa de Incentivos para Veículos Médios e Pesados de Emissão Zero (iMHZEV). A meta é que 100% das novas vendas de veículos leves sejam de zero emissão até 2035. O Programa de Incentivos para Veículos de Emissão Zero (iZEV) foi lançado em 2019 e continua até 31 de março de 2025 (ou até o esgotamento dos recursos disponíveis). No país, os ZEVs são os veículos elétricos a bateria (BEVs), elétricos híbridos plug-in (PHEVs) e os elétricos com célula a combustível (FCEVs).

Para ser elegível no Programa de incentivos iZEV, o veículo deve atender a todos os Padrões de Segurança de Veículos Automotores do Canadá. São elegíveis apenas veículos novos, com menos de 10.000 km rodados, se estiver na concessionária, e, por alguns meses em veículos de locação. Os níveis de incentivos elegíveis até \$ 5.000 são destinados para os veículos a bateria elétrica, célula a combustível e plug-in com autonomia igual ou superior a 50 km. Elegíveis até \$ 2.500 os veículos híbridos plug-in com autonomia inferior a 50 km. Também há incentivos para reduções de impostos para empresas, a taxa de redução de 30% destina-se a Classe 54 (automóveis e veículos de passageiros), para Classe 55 (veículos e taxa de redução de 40%, para Classe 55 (automóveis de aluguel) a taxa de redução é 40%. A Tabela 1, reúne dados sobre o Plano Nacional do Governo Canadense.

Tabela 1 – Informações sobre o Plano Nacional do Canadá.

CANADÁ	
Condições aplicáveis para FCEVs	<p>Veículos de passageiros com preço menor que US\$ 55.000 ou, quando mais robusto, até US\$ 65.000.</p> <p>Veículos de maior porte como perua, caminhonete, veículo utilitário esportivo (SUV), minivan, van ou veículos para fins especiais com preço menor que US\$ 60.000 ou, quando mais robusto, até US\$ 70.000.</p> <p>Os incentivos à compra de veículos com emissão zero, incluindo FCEVs, serão aplicados no ponto de venda.</p> <p>Algumas regiões locais têm seus próprios incentivos ZEV, e podem ser acumulados, desde que o valor combinado do desconto federal e provincial/territorial não exceda 75% do Preço de Varejo Sugerido pelo Fabricante (MSRP).</p>
Tipos de veículos	Os mesmos benefícios se aplicam aos BEV, FCEV, PHEV
Taxação para as empresas	100% de dedução de impostos.
Condições aplicáveis aos FCEVs	<p>Veículos com 100% de emissões zero utilizados pelas empresas. Incluem veículos leves e médios: veículo motorizado que seja um híbrido plug-in (com capacidade de bateria de pelo menos 7 kwh) ou veículos totalmente elétricos ou totalmente movidos a hidrogênio.</p> <p>Veículos pesados adquiridos com objetivo comercial que receba o subsídio federal de compra não são elegíveis para este benefício fiscal.</p>

3.2. Estados Unidos

Cerca de 25% do estoque global de veículos FCEVs em circulação, os EUA estão entre os países líderes na comercialização ampla de células a combustível para o transporte. A nível estadual, a Califórnia, Texas e Louisiana são reconhecidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos como os principais estados produtores e comercializadores de hidrogênio. Das 58 estações de abastecimento existentes no país, segundo a Hydrogen Fuel Cell Partnership, e estão localizadas no Norte do país.

O país possui políticas e incentivos para os mais diferentes modais, com interesses específicos de descarbonizar o setor, mas também de comercializar as tecnologias já otimizadas. Iniciativas, incluem “Subsídios para Projetos de Demonstração de Hidrogênio”, o Crédito de Produção de Hidrogênio Limpo, com extensão de 30% para uso de células a combustível e 30% para armazenamento de energia, até 2024. Os BEVs, PHEVs e FCEVs adquiridos antes de janeiro de 2023 são elegíveis para crédito de imposto de renda federal que depende do tempo em que o veículo foi adquirido e da capacidade da bateria. A Tabela 2 resume dados sobre o Plano de mobilidade no país.

Tabela 2 – Informações sobre o Plano Nacional dos Estados Unidos.

ESTADOS UNIDOS	
Créditos Fiscais Federais para Veículos Novos Totalmente Elétricos e Híbridos Plug-in	Adquiridos antes de 1º de janeiro de 2023 podem ser elegíveis para um crédito de imposto de renda federal de até US\$ 7.500. Condições: quando o veículo foi adquirido e colocado em serviço, a capacidade da bateria usada para alimentar o veículo, onde o veículo foi fabricado e se o limite de vendas para o fabricante do veículo foi previamente atendido.
Clean Vehicle Rebate Project (CVRP)	Descontos de US\$ 1.000 a US\$ 7.500 para a compra ou aluguel de veículos novos elegíveis de emissão zero
Airport Zero Emission Vehicle (ZEV) and Infrastructure Incentives	Financiamento aos aeroportos por até 50% do custo para adquirir ZEVs e instalar ou modificar infraestrutura de suporte para veículos adquiridos.
Alternative Fuel Corridor (AFC) Grants	Carregamento de veículos elétricos acessíveis ao público e a infraestrutura de abastecimento de hidrogênio, propano e gás natural ao longo dos afcs designados pela DOT Federal Highway Administration.
Alternative Fuel Excise Tax Credit	Incentivo fiscal para combustível alternativo usado em veículos. Um crédito fiscal no valor de \$ 0,50 por galão (gás natural, hidrogênio liquefeito, propano, combustível P-Series, derivado do carvão através do processo Fischer-Tropsch e gás comprimido ou liquefeito derivado de biomassa).
Alternative Fuel Infrastructure Tax Credit	Crédito fiscal de 30% do custo, não superior a \$ 30.000.
Alternative Fuel Tax Exemption	Isenção de impostos federais sobre combustíveis alternativos considerados não tributáveis pelo Internal Revenue Service (IRS).
Carbon Reduction Program (CRP)	Financiamento para atividades de eletrificação de paradas de caminhões, retrofits de motores a diesel, equipamentos de comunicação veículo-infraestrutura, transporte público, eletrificação de portos e implantação de veículos com combustível alternativo, incluindo infraestrutura de carregamento ou abastecimento e compra ou aluguel de veículos com emissão zero.
Charging and Fueling Infrastructure Grants	Programa de Financiamento por Concessão Discricionária de Infraestrutura de Carga e Abastecimento (Programa CFI) para implantar infraestrutura de abastecimento e carga de veículos elétricos acessíveis ao público em comunidades urbanas e rurais e ao longo de Corredores de Combustível Alternativo (AFC).
Clean School Bus	Crédito fiscal para imposto de renda federal para veículos limpos comprados (FCV ou FV).
Commercial Electric Vehicle (EV) and Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Tax Credit	financiamento para a substituição de ônibus escolares existentes por ônibus escolares limpos e com combustível alternativo ou ônibus escolares com emissão zero.
Commercial Electric Vehicle (EV) and Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Tax Credit	15% do preço de compra do veículo para veículos elétricos híbridos plug-in; 30% do preço de compra do veículo para EVs e FCEVs; O custo incremental do veículo em comparação com um veículo de motor de combustão interna equivalente.
Congestion Mitigation and Air Quality (CMAQ) Improvement Program	Financiamento para Departamentos Estaduais de Transporte (DOTs), governos locais e agências de trânsito para projetos e programas que ajudam a atender aos requisitos da Lei do Ar Limpo.

Electric Vehicle (EV) Charging and Clean Transportation Grants	Subsídios para projetos de pesquisa de descarbonização de transporte.
Electric Vehicle (EV) and Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Manufacturing Loans	Doações ou garantias de empréstimos por meio do Programa de Garantia de Empréstimos para a produção doméstica de veículos híbridos eficientes, veículos elétricos híbridos plug-in, veículos totalmente elétricos e veículos elétricos com célula a combustível.
Electric Vehicle (EV) and Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Manufacturing Tax Credit	Projetos de energia avançados qualificados são elegíveis para um crédito fiscal de 30% para investimentos em projetos para reequipar, expandir ou estabelecer certas instalações de fabricação.
Electric Vehicle (EV) and Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Tax Credit	Através da Lei de Redução da Inflação de 2022 um aumento no limite de crédito de 30% para o Crédito de Propriedade de abastecimento de Combustível Alternativo de \$ 30.000 para \$ 100.000 e créditos para veículos com célula a combustível, incluindo veículos comerciais. O veículo deve ser certificado como zero emissões pelo CARB e considerado "comercialmente disponível".

3.3 Alemanha

O Programa de Ação Climática 2030 da Alemanha inclui preços de carbono elevados, incentivos para a mobilidade e o uso de energia renovável. Para cumprir as metas climáticas, quando comparada ao ano de 1990, as emissões de tráfego e transporte mostram a necessidade da redução de 42% até 2030. A Alemanha segue um fluxo de desenvolvimento de políticas de incentivos relacionados aos FCEVs no continente europeu. A União Europeia estabeleceu metas obrigatórias para a implantação de infraestrutura de combustíveis alternativos que também inclui hidrogênio. As metas propostas são implementar um dispensador a cada 400 km, 425 estações de abastecimento e infraestrutura para aviões movidos a hidrogênio (Power Technology Research, 2023).

O Governo Federal introduziu uma proposta de imposto futuro para carros emissores, a partir da capacidade cúbica dos automóveis, baseado nas emissões de CO₂ do carro. Esse imposto deve aumentar ao longo dos anos, em seis níveis de € 2 a € 4 para cada grama de CO₂ emitida por quilômetro. Também fornece mais de € 1 bilhão para financiar plantas de produção de combustíveis baseados em eletricidade e biocombustíveis avançados. A Tabela 3, sumariza pontos importantes deste plano.

Tabela 3 – Plano Nacional da Alemanha.

ALEMANHA	
Subsídio de Compra para carros novos	€ 4.000 para carros elétricos não híbridos e € 3.000 para híbridos plug-in. A subvenção é paga para a compra de carros com preço de tabela de até € 60.000. O financiamento total está limitado a 1,2 mil milhões de euros. O veículo deve constar da lista elétrica

	elegível do Escritório Federal de Economia e Controle de Exportações (BAFA List).
Infraestrutura de carregamento	€ 300 milhões para expandir a infraestrutura de carregamento. € 200 milhões estão disponíveis para infraestrutura de carregamento rápido e € 100 milhões para carregamento normal.
Benefício através de carregamento Bundesrat	Funcionários podem recarregar seus veículos no local de trabalho. Os carregadores são isentos de imposto de renda. São ainda concedidos incentivos fiscais aos carregadores cedidos ao trabalhador gratuitamente ou a preço reduzido.
Contratação pública de veículos elétricos	Pelo menos 20% da frota automóvel da Federação será constituída por veículos elétricos.
Electric Mobility Act	Atribui um rótulo e privilégios aos carros elétricos nas estradas da Alemanha. A lei dá aos municípios a possibilidade de conceder tratamento preferencial aos veículos elétricos – ou seja, veículos puramente movidos a bateria, híbridos plug-in e veículos com célula a combustível – principalmente em termos de estacionamento e uso de faixas de ônibus.
Lei do Imposto sobre Veículos Automotores/IPVA	A Lei do Imposto sobre Veículos Automotores concede uma isenção fiscal por dez anos a partir da data do primeiro registro de veículos de passageiros elétricos não híbridos no período de 18 de maio de 2011 a 31 de dezembro de 2025, mas não mais do que até 31 de dezembro de 2030. (§ 3d KraftStG).
Incentivo a projetos de pesquisa	o Governo Federal forneceu € 2,2 bilhões para pesquisa e desenvolvimento em mobilidade elétrica, a fim de apoiar a geração de inovações tecnológicas a partir de programas de P&D tecnologicamente neutros.
Subsídios para Ônibus e Caminhões	Aquisição de ônibus elétricos para o transporte público local (ÖPNV) com até 80% dos custos adicionais de investimento.
Incentivos não econômicos	Acesso em faixas especiais; Estacionamento grátis; isenção ou redução de taxas de estacionamento em estradas ou caminhos públicos; carros elétricos de passageiros e veículos leves podem ser conduzidos em faixas de ônibus; Acesso livre para uso restrito; suspensão ou redução das taxas de estacionamento em vias públicas ou vias de circulação.
Referência a meta não vinculativa Diretiva sobre Veículos Limpos	Uma das metas estabelecidas pelo governo alemão neste programa de proteção climática para 2023 é aumentar a proporção de compras de veículos novos com tecnologias alternativas e ambientalmente corretas para o máximo de 40% até 2025 e 100% até 2030. Estes incluem veículos elétricos a bateria, veículos a célula a combustível, veículos elétricos híbridos recarregáveis externamente, bem como veículos que podem comprovadamente funcionar com 100% de biogás. Veículos especiais (incluindo veículos militares e de emergência) e veículos pesados de carga estão excluídos desta cota.

A Alemanha tem estruturado um arcabouço regulatório que inclui a adoção da Portaria da Estação de Carregamento implementada pela Diretiva da UE (2014/94/EU) na legislação nacional. Esta diretiva regula o estabelecimento da infraestrutura para combustíveis alternativos e estabelece regras vinculativas para harmonizar os padrões para estações de carregamento acessíveis ao público, dando aos investidores maior segurança ao construir sua infraestrutura de carregamento.

3.4. Holanda

A Holanda é ativa na promoção do uso do hidrogênio verde para a mobilidade urbana. Alguns dos projetos de maior destaque envolvendo o hidrogênio verde incluem os projetos:

WaterstofRegio 2.0: que visa desenvolver rede de postos de reabastecimento de hidrogênio e introduzir FCEVs no país;

H2OV: envolve a implantação de 20 ônibus do transporte público, com células a combustível, nas cidades de Arnhem e Apeldoorn. A meta é demonstrar a viabilidade do uso do hidrogênio como combustível para o transporte público e promover o desenvolvimento da infraestrutura de hidrogênio na região;

H2-Share: visa desenvolver infra-estrutura de reabastecimento de hidrogênio e implantar uma frota de 25 caminhões leves e médios a célula a combustível na área de Rotterdam. Também visa demonstrar a viabilidade técnica e econômica dos caminhões a célula a combustível para operações logísticas e promover o desenvolvimento da infraestrutura de hidrogênio na região;

H2FUTURE: A meta é de produzir hidrogênio verde para a mobilidade urbana e envolve a construção de usina de produção de hidrogênio verde de 10 MW utilizando fontes de energia renováveis;

WaterstofNet: uma rede holandês-belga que promove o uso do hidrogênio para várias aplicações, incluindo a mobilidade urbana. A rede possui projetos relacionados à infraestrutura de hidrogênio, que inclui a implantação de veículos a hidrogênio e rede de postos;

HyMove: A meta é promover o desenvolvimento da tecnologia e infraestrutura de hidrogênio e apoiar a implantação de veículos a célula a combustível na região.

3.5. Reino Unido

O Reino Unido lançou vários projetos para introduzir ônibus a célula a combustível em várias cidades, incluindo Londres e Aberdeen. Os projetos incluem diversas parcerias de empresas, incluindo Wrightbus, Ballard Power Systems, e ITM Power. Com destaque para os projetos de:

Expansão da Rede de Hidrogênio de Londres (LHNE): colaboração entre agências governamentais, setor industrial e instituições acadêmicas para desenvolver uma rede de postos de reabastecimento de hidrogênio em Londres. O objetivo é apoiar a implantação de FCVs para transporte público e privado;

HyFive: financiada pela União Europeia visa implantar 110 FCVs em cidades da Europa, infra-estrutura de reabastecimento e promover mobilidade urbana;

Ônibus a Hidrogênio de Aberdeen: parceria entre o Conselho Municipal de Aberdeen, o First Aberdeen e o governo escocês. Visa a implantação de 10 ônibus movidos a hidrogênio (FCEB) e a construção de uma estação de reabastecimento de hidrogênio. A meta é reduzir a poluição do ar e melhorar a qualidade do ar na cidade;

INSPIRE: pretende desenvolver rede de postos de reabastecimento de hidrogênio no sudeste da Inglaterra e apoiar a implantação de FCVs para transporte urbano. O projeto é uma colaboração entre parceiros da indústria e instituições acadêmicas;

A Tabela 4 resume alguns dados do Plano Nacional do Reino Unido.

Tabela 4 – Dados sobre o Plano Nacional do Reino Unido.

REINO UNIDO	
Veículos Leves	Incentivos não econômicos para a introdução de FCEVs
Valor Líquido (EUR) ou participação subsidiada (%) para FCEVs	35% até 2.850 euros
Condições aplicáveis para FCEVs	Os veículos de passageiros FCEV são elegíveis para a concessão de Plug-in operada pelo Office for Zero Emission Vehicles (OZEV) dentro do Departamento de Veículos de Transporte devem atender aos critérios de Veículos com Emissões Ultrabaixas para a concessão de Plug-in. Os carros devem ter emissões de CO ₂ inferiores a 50g/Km e poder percorrer pelo menos 112 Km (70 milhas) sem nenhuma emissão. Os carros elegíveis devem custar menos de £ 35.000 (EUR 40.000), incluindo a entrega e o IVA. A subvenção proporciona 35% do custo de compra até 2.850 euros (2.500 libras esterlinas). A lista de veículos pré-aprovados é fornecida no link abaixo.
Referências (FCEV)	Departamento de Transportes para Veículos com Baixas Emissões e Escritório para Veículos com Emissões Zero: Subsídio para veículos plug-in.
Condições aplicáveis para BEVs	O "Plug-in car grant scheme" e os esquemas de ônibus de emissão zero ultrabaixa abrangem os FCEVs e BEVs de forma semelhante.
Veículos Leves	Benefícios fiscais de Registro
Condições aplicáveis para FCEVs	Um carro com emissão zero tem um VED (Vehicle Excise Dut) a pagar no primeiro registro quando novo. O valor da economia do VED é relativo às emissões de CO ₂ do veículo que está sendo substituído. O VED máximo é para um carro com emissão de CO ₂ de 255g/Km.
Referências (FCEV)	As taxas VED são estabelecidas pelo Tesouro; a opinião dos governos é que as taxas de impostos sobre veículos devem refletir mais de perto os impactos ambientais da circulação.
Condições aplicáveis para BEVs	A categoria de emissão zero para a taxa 0% de imposto sobre veículos (VED) é aplicável tanto para as categorias FCEV como BEV.
Veículos Leves	Benefícios fiscais da propriedade

Condições aplicáveis para FCEVs	O imposto anual sobre veículos (VED) é de 0% para veículos com emissão zero para 2020 (mas aumentará para 1% em 2022 e 2% em 2023). A taxa anual atual do VED é de 166 euros para um carro com motor convencional.
Referências (FCEVs)	O imposto anual sobre veículos (VED) é de 0% para veículos com emissão zero para 2020 (mas aumentará para 1% em 2022 e 2% em 2023). A taxa anual atual do VED é de 166 euros para um carro com motor convencional.
Condições aplicáveis para BEVs	A taxa de 0% de imposto sobre veículos (VED) é aplicável tanto para as categorias FCEV quanto BEV.
Veículos Leves	Benefícios fiscais da empresa
Valor (EUR) para FCEVs	Redução no pagamento do imposto de sociedades
Condições aplicáveis para FCEVs	Se comprado por uma empresa, o ativo do veículo com emissão zero se qualifica para o primeiro ano, amortizar as licenças que podem deduzir o custo total da compra no primeiro ano de compra dos lucros da empresa antes dos impostos. Isto é um acréscimo a uma Permissão Anual de Investimento
Referências (FCEVs)	As "Licenças de Capital de Entrada" (um tipo de licença para o primeiro ano) provavelmente foram criadas entre 2019 e 2020 para equipamentos energeticamente eficientes, incluindo veículos com emissões zero e é adicionado a uma Licença Anual de Investimento (que são limitadas).
Veículos Leves	Outros benefícios financeiros e subsídios oferecidos à FCEVs
Condições aplicáveis para FCEVs	O imposto sobre combustíveis é aplicado aos combustíveis fósseis (gasolina, diesel, GNV), mas não ao hidrogênio para FCEVs. O imposto economizado é de 0,64 EUR/litro em relação à gasolina/diesel.
Referências (FCEVs)	A economia no serviço de combustível é parte dos benefícios disponíveis para os veículos de Ultrabaixa emissão (ULEV), incluindo os motores FCEV - os benefícios estão disponíveis para usuários particulares e comerciais.
Veículos Pesados	Subsídio de Compra
Valor líquido (EUR) ou ação subsidiada (%) para FCEVs	20% de desconto no preço de compra de caminhões até um máximo de £ 16.000 (EUR 18.240) para os primeiros 10 caminhões por cliente para o primeiro UR 9.000 no máximo.
Condições aplicáveis aos FCEVs	Deve atender aos critérios do Veículo de Emissão Ultrabaixa para a Concessão de Plug-in que requer grandes vans e caminhões com emissões de CO ₂ de pelo menos 50% menores do que o veículo convencional Euro VI equivalente que pode transportar a mesma capacidade. Também devem ser capazes de percorrer pelo menos 100 Km (60 milhas) sem nenhuma emissão
Referências (FCEVs)	Veículos de baixa emissão elegíveis para uma concessão de plug-in. O esquema para furgões e caminhões pesados é operado pelo Office for Zero Emission Vehicles (OLEV). A política de apoio é implementada pelo OLEV, Departamento de Transporte e tem como objetivo permitir ao Reino Unido atender às exigências dos créditos de carbono estabelecidos sob a Lei de Mudança Climática de 2008.
Ônibus e Caminhões	Subsídio de compra
Condições aplicáveis aos FCEVs	Ônibus e ônibus não são cobertos pelo esquema de concessão de carros não plug-in. Um programa separado tinha sido criado de 2014 até 2021. Um esquema de área regional de ônibus com emissão zero (ZEBRA), em vez disso, destina-se a entregar até 500 ônibus, em confecção

	com um compromisso governamental mais amplo de introduzir 4.000 ônibus com emissão zero. Os detalhes completos do esquema de 4.000 ônibus com emissão zero não são totalmente liberados e serão disponibilizados quando estiverem prontos. Separately, o governo escocês concedeu £ 40,5 milhões ao Scottish Ultra-low Emission Bus Scheme para apoiar os operadores a reclamar 215 ônibus antigos a diesel com novos modelos de emissão zero.
Veículos pesados	Outros benefícios e subsídios financeiros oferecidos à FCEVs
Condições aplicáveis aos FCEVs	O Esquema de Incentivo ao Operador de Ônibus é um incentivo de Ultra-Baixa Emissão por Km (que antes de 2020 era de EUR 0,07 Km, o esquema evidenciava que após 2020 poderia ser aumentado com o objetivo de potencialmente adotar um incentivo relacionado à economia de emissões, de modo que uma maior economia de emissões poderá recompensada por uma maior taxa de incentivo por Km para operações). O pagamento é atualmente em uma base por Km para Ônibus de Ultra Baixas Emissões (incluindo ônibus de célula a combustível) e foi adicionado ao Esquema de Ônibus de Ultra Baixas Emissões (referenciado no Q1.1) que fornece suporte de capital para a compra de ônibus e infraestrutura de combustível.
Referências	Os ônibus totalmente eficientes e de menor emissão de carbono utilizam menos combustível e, portanto, os usuários têm o direito de reivindicar menos apoio financeiro, por isso o incentivo BSOE, LCEB foi criado para equilibrar a redução do retorno do investimento e incentivar os operadores a operar LCEBs. Se um veículo se qualifica como LCEB, LEB ou ULEB e circula em uma rota acessível ao público, ele tem direito a receber EUR 0,07 Km.

3.6. China

A China estabeleceu a meta de ter 1 milhão de FCEVs nas estradas até 2030. Alguns dos projetos mais relevantes sobre hidrogênio para a mobilidade urbana na China são:

Projeto de Foshan: Foshan, na província de Guangdong, tem a maior frota de ônibus a célula a combustível a hidrogênio (FCEBs) do mundo. O projeto foi lançado em 2016 e atualmente tem mais de 1.000 ônibus a célula de combustível em operação.

Projeto de demonstração de Xangai: colaboração entre o governo municipal de Xangai e a SAIC Motor. O projeto visa desenvolver e demonstrar FCEVs e infraestrutura de reabastecimento de hidrogênio.

Projeto de Guangzhou: projeto piloto para FCEVs, com foco em transporte público, logística e serviços municipais. Visa construir um ecossistema completo de energia, incluindo a produção, armazenamento, transporte e reabastecimento de hidrogênio.

Projeto de demonstração de Pequim: esforço conjunto entre o Governo Municipal de Pequim, o Grupo Automotivo de Pequim, Sinopec e PetroChina. O projeto visa promover o uso de FCEVs e infraestrutura de reabastecimento de hidrogênio.

Projeto de Wuhan: projeto piloto de FCEVs, com foco em transporte público e logística com caminhões leves e médios. Visa construir um ecossistema de energia, que inclui produção, armazenamento, transporte e reabastecimento de hidrogênio.

Autoridades chinesas lançaram o 14º Plano Quinquenal de Energia (2021-2025), as metas consistem em aumentar a capacidade anual de produção doméstica de carvão para 4,6 bilhões de toneladas até 2025, definir um aumento gradual da produção anual de petróleo para 200 milhões de toneladas e produção anual de gás natural excedendo 230 bilhões de m³. No entanto, a Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma (NDCR), afirma que o consumo de energia renovável poderá aumentar 20% até 2025, o que representa 39% da geração de energia. A Tabela 5, mostra pontos importantes deste plano.

Tabela 5 – Plano Nacional da China.

CHINA	
Veículos Comerciais Leves	Subsídio de Compra
Condições aplicáveis para FCEVs	6000 RMB/kW de potência bruta FCS x 80% no período de transição a partir de 2019 = subsídio. Subsídio total não superior a 200.000 RMB x 80% = 160.000 RMB = 20.800 EUR.
Referências (FCEVs)	Subsídio: "New Energy Vehicle Developed Guidelines for 2021 to 2035" 80% período de transição: Em relação à continuação da conclusão dos Subsídios para Promoção de Veículos Novos pelo Ministério do Comércio
Condições aplicáveis para BEVs	A partir de 2017, os subsídios BEV na China foram reduzidos em 20% a cada ano, sendo que todos os subsídios BEV iriam expirar até 2020. As exigências de subsídios também foram tornadas mais rígidas nos últimos anos, especificamente ao vincular a porcentagem de subsídios à gama de veículos
Veículos Comerciais Leves	Incentivos não econômicos para a introdução de FCEVs
Outros (Detalhes)	Os FCEVs usufruem do status de "placa verde" na China, o que significa que o usuário não está limitado por controles de congestionamento ou outras restrições, tais como dias ímpares e dias pares em que somente placas com números ímpares ou pares podem passar pelos pontos de controle. Entretanto, restrições específicas podem diferir de cidade para cidade.
Benefícios similares para os BEVs	Muitas cidades dão livre acesso aos carros de "placa verde". Na China, os sedans ICE têm placas azuis e os caminhões ICE (acima de 4t) têm placas amarelas. Entretanto, os BEVs têm placas verdes e

	não são restritos da mesma forma que as placas azuis ou amarelas.
Referência a alvo não vinculativo	Províncias específicas na China têm metas estabelecidas para veículos com baixas e zero emissões. Por exemplo, na província de Guangdong, as principais cidades em Shenzhen e Guangzhou já mudaram 100% para ônibus BEV. O plano para outras cidades da província de mudar para 80 - 85% de ônibus BEV era até 2020.
Condições aplicáveis para BEVs exceto para FCEVs	Com recursos do Fundo de Energia e Clima, o Ministério Federal do Meio Ambiente promove a aquisição de ônibus elétricos para o transporte público local (ÖPNV) com até 80% dos custos adicionais de investimento. Este subsídio é apenas para ônibus híbridos elétricos ou diesel-elétricos a bateria.
Referências BEVs	Diretriz para a Promoção da Aquisição de Ônibus Elétricos no Transporte Público, emitida pelo Ministério Federal do Meio Ambiente, Construção de Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU).
Veículos comerciais leves	Subsídio de Compra
Condições aplicáveis aos FCEVs	300.000 RMB / veículo X 80% período de transição começando em 2019 = 240.000 RMB = 31.200 EUR de subsídio.
Referência (FCEVs)	Subsídio: "Diretrizes para o desenvolvimento de veículos de energia nova para 2021 a 2035". Período de transição de 80%: "Em relação à continuação da conclusão dos subsídios para a promoção de veículos de energia nova por Ministério.
Condições aplicáveis para BEVs	A partir de 2017, os subsídios BEV na China foram reduzidos em 20% a cada ano, com todos os subsídios BEV a expirarem em 2020. As exigências de subsídios também foram tornadas mais rigorosas nos últimos anos, especificamente através da articulação.
Veículos pesados	Subsídio de compra
Condições aplicáveis aos FCEVs	500.000 RMB / veículo X 80% período de transição começando em 2019 = 400.000 RMB = 52.000 EUR de subsídio.
Referência (FCEVs)	Subvenção: "New Energy Vehicle Development Guidelines for 2021 to 2035" período de transição de 80%: "Quanto à continuação da conclusão dos subsídios para a promoção de veículos de energia nova pelo Ministério do Comércio.
Condições aplicáveis para BEVs	A partir de 2017, os subsídios BEV na China foram reduzidos em 20% a cada ano, com todos os subsídios BEV a expirarem em 2020. As exigências de subsídios também foram tornadas mais rigorosas nos últimos anos, especificamente ao vincular a porcentagem de subsídios à gama de veículos.

3.7. Japão

O governo japonês estabeleceu metas para aumentar o uso do hidrogênio como combustível para o transporte, até 2030 pretende implantar 800.000 FCEVs e

construir 900 postos de reabastecimento de hidrogênio. Uma das principais iniciativas na estratégia de hidrogênio verde do Japão é o Fundo de Inovação Verde, que foi criado em 2018 para fornecer financiamento e apoio ao desenvolvimento e comercialização de tecnologias de hidrogênio verde.

O governo tem fornecido subsídios e incentivos fiscais para consumidores e empresas adquiram FCEVs, além de ter feito parcerias com montadoras de automóveis para desenvolver e comercializar FCEVs. Investe no desenvolvimento da infra-estrutura de reabastecimento de hidrogênio. Até 2021, havia mais de 170 postos de reabastecimento de hidrogênio.

O governo de Tóquio lançou um projeto para introduzir ônibus e táxis a célula a combustível. O Japão tem vários projetos e iniciativas importantes relacionados ao hidrogênio para a mobilidade urbana:

Toyota Mirai: a Toyota tem metas para expandir a disponibilidade de postos de abastecimento de hidrogênio para apoiar o crescimento do mercado de FCEVs;

Instituto Fukushima de Energias Renováveis: realiza pesquisas sobre o uso do hidrogênio verde como fonte de energia com baixo teor de carbono para o transporte e outras aplicações. O instituto também desenvolve tecnologias de produção de hidrogênio que utilizam fontes renováveis de energia (energia solar e eólica);

Cidade Inteligente de Yokohama: colaboração entre o governo e empresas privadas para desenvolver uma comunidade urbana sustentável e de baixo carbono em Yokohama. O projeto inclui o uso de FCEVs, o desenvolvimento da infra-estrutura de produção e distribuição de hidrogênio;

Mobilidade Verde Kawasaki: O projeto inclui a construção da instalação, produção e distribuição de hidrogênio, bem como a implantação de FCEVs e outras tecnologias.

3.8. Coreia do Sul

O governo estabeleceu a meta de 80.000 FCEVs e 310 postos de reabastecimento de hidrogênio até o final 2022. A Tabela 6, resume algumas políticas do Plano Nacional da Coreia do Sul.

Tabela 6 – Plano Nacional da Coreia do Sul.

CORÉIA DO SUL	
Veículos de passageiros	Subsídio de compra

Condições aplicáveis para FCEVs	Programa de implantação de carros ecológicos (Ministério do Meio Ambiente, MDE) com subsídio correspondente do governo local entre 7.414 e 12.975 euros.
Referências (FCEVs)	Artigo 18, Decreto de Execução da Lei Sobre a Promoção do Desenvolvimento e Distribuição de Veículos Automotores Ambientais (Apoio aos compradores de veículos automotores ambientais) (1) Os chefes das agências administrativas centrais relacionadas ou os prefeitos/governadores podem fornecer apoio aos compradores de veículos automotores ambientais, de acordo com o artigo 10 da Lei.
Condições aplicáveis para BEVs	Os BEVs podem receber até 14.680 euros em subsídios de compra. Os subsídios de compra são fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente (até 6.955 euros) e pelo governo local (até 7.725 euros).
Veículos de Passageiros	Benefícios fiscais de registro
Condições aplicáveis para FCEVs	Um imposto especial sobre o consumo, um imposto educacional e impostos de aquisição devem ser pagos ao comprar um veículo na Coreia. Os FCEVs têm benefícios de redução de impostos de até 3.854 euros no imposto especial sobre consumo e impostos sobre educação, além de até 1.038 euros em impostos de aquisição.
Referências (FCEVs)	Artigo 18, Decreto de Execução da Lei sobre a Promoção do Desenvolvimento e Distribuição de Veículos Automotores Ambientais (Apoio aos compradores de veículos automotores ecologicamente corretos) (2). Os detalhes referentes aos padrões, métodos, procedimentos e valor do apoio previsto no parágrafo (1) deverão ser prescritos e notificados publicamente pelo Ministro do Meio Ambiente, após ouvir os chefes das agências administrativas centrais relacionadas a prefeitos/governadores.
Referências (BEVs)	Ministério do Meio Ambiente
Explicação da cota de aquisição obrigatória	Instituições públicas e empresas públicas locais que utilizam veículos > Mais de 80% da compra anual de veículos deve ser de EV para FCEV.
Cota de compras vinculada-Referência	Ato sobre a Promoção do Desenvolvimento e Distribuição de Veículos Automotores Benéficos ao Meio Ambiente Artigo 10 -2 (Obrigação das instituições públicas de adquirir veículos automotores amigáveis ao meio ambiente).(1) Ao comprar ou alugar um veículo para uso comercial, o diretor de uma instituição pública, de acordo com a Lei de Gestão de Instituições Públicas, e o diretor de uma empresa pública local, de acordo com a Lei de Empresas Públicas Locais, deverão certificar-se de que os veículos motorizados que não agridem o meio ambiente representem pelo menos uma determinada proporção de todos os veículos comprados ou alugados, conforme prescrito pelo Decreto Presidencial. Artigo 10 - 3 (Compra de veículos automotores ecologicamente corretos). O Ministro do Comércio, Indústria e Energia poderá, se considerar necessário, promover o fornecimento de veículos automotores ecologicamente corretos.
Veículos de Passageiros	Benefícios fiscais de propriedade
Condições Aplicáveis para FCEVs	O imposto anual sobre veículos é cobrado de acordo com a quantidade de emissões. Os FCEVs são aplicados com 100 euros por ano.
Veículos de Passageiros	Outros benefícios financeiros e subsídios oferecidos aos FCEVs

Valor (EUR) para FCEVs	Subsídio para combustível de ônibus a hidrogênio (2021): 3500 won/kg. Táxis e caminhões de carga a hidrogênio serão aplicados a partir de 2023.
Veículos de Passageiros	Incentivos não econômicos para a introdução de FCEVs
Outros (Detalhes)	Desconto de 50% para estacionamentos públicos; Isenção de congestionamento de tráfego; Desconto de 50% nos pedágios de vias expressas.
Veículos comerciais rápidos	Benefícios fiscais de registro
Condições aplicáveis para BEVs	Os BEVs têm uma redução de impostos até 3.929 euros no imposto especial de consumo, nos impostos de educação e nos impostos de aquisição.
Autocarros e camionetas	Subsídio de compra
Condições aplicáveis aos FCEVs	1. Programa de implantação de carros ecológicos (Ministério do Ambiente, MOE) 111.223 EUR; 2. Subsídio correspondente das autarquias locais entre 0 e 111.223 EUR; 3. Subvenção para autocarros de piso rebaixado (Ministério do Território, das Infra-estruturas e dos Transportes, MOLIT) com subvenção correspondente das autarquias locais subtotal 66,685 EUR. * Em 2022, existe apenas um modelo de autocarro FC na Coreia do Sul, que é o autocarro de piso rebaixado.
Referência (FCEVs)	[Programa de implantação de carros ecológicos]. Artigo 18º, Decreto de Execução da Lei Relativa à Promoção do Desenvolvimento e Distribuição de Veículos Automóveis Ambientais (Apoio aos compradores de veículos a motor ecológicos). (1) Os chefes dos organismos administrativos centrais relacionados ou os presidentes de câmara/governadores podem prestar o seguinte apoio aos compradores de veículos a motor ecológicos, em conformidade com o artigo 10º da lei. [Plano de distribuição de autocarros de piso rebaixado]. Artigo 14º, Ato Relativo à Promoção da Conveniência de Transporte das Pessoas com Deficiência de Mobilidade (Quando o Estado e as autarquias locais introduzirem autocarros de piso rebaixado entre outros. (incluindo os casos de instalação de elevadores para cadeiras de rodas nos autocarros existentes), como previsto no parágrafo n.º 3, devem prestar apoio financeiro, dentro dos limites orçamentais, às empresas de transporte de passageiros de linhas regulares).
Condições aplicáveis para BEVs	Os BEVs podem receber até 14 680 euros em subsídios de compra. Os subsídios de compra são concedidos pelo Ministério do Ambiente (até 6 955 euros) e pela administração local (até 7 725 euros).
Autocarros e camionetas	Outros benefícios financeiros e subsídios oferecidos aos FCEV
Condições aplicáveis para FCEVs	Subsídio ao combustível para autocarros a hidrogênio (2022) 3500 won/kg.
Referência (FCEVs)	Ministério do Solo, da Infraestrutura e dos Transportes
Autocarros e camionetas	Incentivos para FCVEs não econômicos - introdução
Referências BEVs	Ministério do Meio Ambiente
Cotas de compras vinculadas - explicação	Uma pessoa que conduz um negócio de transporte de ônibus urbano e tem mais de 200 carros no final do ano comercial anterior > Mais de 6% da compra anual de veículos deve ser de FCEV.
Veículos pesados	Subsídio de compra

Condições aplicáveis para FCEVs	333.577 euros por subsídio para compra de caminhão a hidrogênio (185.321 euros de subsídios do Ministério do Meio Ambiente/148.256 euros de subsídios do governo local).
Referências FCEVs	Ministério do Solo, da Infraestrutura e dos Transportes
Veículos pesados	Outros benefícios financeiros e subsídios oferecidos aos FCEVs
Condições aplicáveis para FCEVs	O subsídio de combustível para táxis e caminhões pesados a hidrogênio será aplicado a partir de 2023 (o valor do subsídio ainda não foi decidido).

3.9. Austrália

O governo ACT (Australian Capital Territory), pretende atingir emissões líquidas de GEE até 2050. As estratégias são incentivos para a diminuição das viagens de carro, trocando por outras formas de transporte com emissões zero, (caminhadas, ciclismo e transporte público). A política da ACT promoveu ações na eletricidade a partir de fontes renováveis e o uso de veículos com emissão zero. As ações são para apoiar a adoção de veículos (PHEVs, BEVs, FCEVs e bicicletas elétricas). O governo ACT oferece isenção do imposto de selo e do desconto de registro. Residências e empresas podem ter acesso a empréstimos de veículos com taxa reduzida de compra através de vários financiadores apoiados pela Corporação Financeira de Energia Limpa do Governo Australiano. As ações estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Políticas Públicas da Austrália

AUSTRÁLIA	
Veículos Comerciais Leves	Subsídio de Compra
Valor líquido (EUR) ou ação subsidiada (%) para FCEVs	Imposto de selo zero sobre veículos novos com emissão zero.
Veículos Comerciais Leves	Benefícios fiscais de registro
Valor líquido (EUR) para FCEVs	20% de desconto nas taxas de inscrição.
Condições aplicáveis para BEVs	20% de desconto nas taxas de registro quando registrado na jurisdição ACT.

Estes dados foram coletados no Observatório de Células a Combustível e Hidrogênio (<https://www.fchobservatory.eu/>) até fevereiro de 2022 o website da FCHO forneceu detalhes sobre cada política e como ela afetou o hidrogênio nas diferentes áreas da cadeia de valor. A cobertura geográfica de Políticas Nacionais do Observatório FCH inclui 38 entidades. Estas 38 entidades são compostas por 37 países e uma unidade subnacional, o Estado da Califórnia. O Observatório FCH recebeu respostas de 34 das 38 entidades. Como resultado, os dados incluídos online cobrem 34 países, 26 dos quais, são membros da UE/EFTA/UK.

3.10. Brasil

No Brasil, houve projetos de ônibus urbanos movidos a células a combustível, com o apoio do Ministério de Minas e Energia (MME) e pela Companhia Metropolitana de Ônibus Urbanos (EMTU/SP). Em 2000, o projeto “*Hydrogen Fuel Cell Buses for Urban Transportation in Brazil*”, financiado pelo *Global Energy Facility* (GEF) e pelo governo brasileiro (FINEP) foi iniciado e resultou em três ônibus, inicialmente. O projeto finalizado em 2007, consistiu na fabricação, operação e manutenção de quatro ônibus com célula a combustível por parte do consórcio formado pelas empresas: Ballard Power Systems, AES Eletropaulo, Epri, Hydrogenics, Tutto Trasporti, Nucellsys, Petrobras Distribuidora e Marcopolo, além da instalação de uma estação de produção de hidrogênio por eletrólise a partir da água e abastecimento dos ônibus. Desse modo, o Brasil se tornou o primeiro país da América Latina a possuir uma frota de ônibus movido a células a combustível (FINEP, 2023).

Em 2010, um projeto da UFRJ resultou na construção e operação de um ônibus híbrido bateria/célula a combustível, com possibilidade de carregamento do banco de baterias a partir da rede, da célula a combustível e de um sistema de regeneração da energia de frenagem. A primeira versão foi concluída em 2010, a segunda foi apresentada em 2012 na Conferência Rio+20 e a terceira versão foi demonstrada nos Jogos Olímpicos de 2016, no Rio de Janeiro, em condições pré-comerciais. No entanto, as análises de viabilidade mostraram que inicialmente, o Brasil não precisava estrategicamente investir em veículos eletrificados. Mas, o aumento dos níveis de emissões devido ao transporte, tem proporcionado reflexão sobre o tema.

A Nissan, tem desenvolvido sistemas movidos a célula de combustível de óxido sólido (SOFC), com a reforma de etanol, que funcionaria com combustível de grande potencial estratégico para o Brasil. O hidrogênio pode ser obtido a partir da reforma de etanol em um reformador interno ao veículo. Em 2019, a fabricante japonesa financiou o projeto com meta de desenvolver um protótipo de veículo com célula a combustível de óxido sólido (SOFC) que funciona com energia gerada por etanol, sem combustão, no Laboratório de Genômica e BioEnergia da Unicamp. Os testes evidenciaram resultados promissores, trazendo uma nova concepção de tecnologia nacional para o Brasil (NISSAN MOTOR CORPORATION, 2023).

A partir do Rota 2030, há projetos que envolvem a adição de hidrogênio, na forma de mistura com os combustíveis atuais, nos motores de combustão interna ou a geração a bordo do hidrogênio a partir da reforma do etanol. O etanol brasileiro permite o ciclo do carbono, diminuindo os problemas ambientais como efeito estufa (GEE) em cerca de 90%, enquanto o etanol dos EUA reduz 30%. O combustível limpo produzido a partir da biomassa da cana-de-açúcar tem alto teor de hidrogênio e não requer adaptações na infraestrutura de distribuição. As montadoras têm se referido ao Brasil como um país que já resolveu as questões de infraestrutura do hidrogênio verde por ter toda a infraestrutura do etanol já instalada, com destaque aos Estados do Nordeste. Projetos como o da Shell, mostram o interesse das multinacionais a partir deste insumo (Biomass Magazine, 2023).

4. Considerações Finais

No Brasil, não há um documento que reúna informações sobre as normas e padrões a serem seguidos neste setor, principalmente quanto às estações de abastecimento (HRS). As normas referentes a células a combustível não estacionárias tendo a mobilidade como foco são compreendidas a partir de um conjunto provenientes principalmente da ISO, IEC, CGA e SAE. No âmbito da IEC, as variações IEC 62282-4-101 e 62282-4-102, tratam da segurança e dos métodos de testes de desempenho em células a combustível não estacionárias. Pode-se afirmar que as barreiras estão relacionadas a disseminação do uso do hidrogênio na mobilidade de veículos (automóveis, ônibus, caminhões) com emprego de células a combustível, custo elevado e inexistência de uma rede de abastecimento de hidrogênio.

A experiência internacional demonstra que uma série de projetos tem caminhado com sucesso. Pode-se esperar novos desenvolvimentos políticos em toda a cadeia de abastecimento no setor de transporte para a implantação e operação de novas infraestruturas de hidrogênio, bem como incentivos.

No Brasil, há uma discussão sobre a importância do desenvolvimento da eletrificação dos transportes. A cadeia de valor do hidrogênio produzido por reforma e o uso de células de óxido sólido continuará evoluindo, por questões estratégicas. Políticas adicionais, como regulamentações técnicas na produção, transmissão e distribuição, armazenamento e os vários usos finais devem ser preparadas ao passo que a tecnologia for sendo desenvolvida. Ademais, é possível avaliar que o arcabouço regulatório para o setor deve progredir a passos lentos.

INTERNATIONAL BENCHMARKING RELATED TO LEGISLATIONS AND REGULATIONS ON THE USE OF HYDROGEN FOR MOBILITY

Robson do Carmelo Santos Barreiros¹, Sayonara Andrade Eliziário^{1,2}, Marta Célia Dantas^{1,2}, Flávio Wilson Barreiros Oliveira¹, Mirna Dimenstein¹, Priscilla Bernardo Mendonça Barreiros¹, Bruno Nunes Guedes^{1,3}.

¹Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação / robson.carmelo@iati.org.br / flavio.oliveira@iati.org.br / mirnadimenstein@hotmail.com / pmendonca01@hotmail.com

²Universidade de Federal da Paraíba - UFPB / Campus João Pessoa - PB / marta.cds@cear.ufpb.br / sayonara@cear.ufpb.br

³Universidade de Pernambuco - UPE / Campus Salgueiro / bruno.guedes@upe.br

Abstract

Brazil has potential for hydrogen production, being able to meet demand in countries in Europe and Asia. The literature reports that the sectors for the application of hydrogen are industry and mobility. The use of hydrogen in mobility, for heavy vehicles, has been encouraged in countries such as Germany, Australia and Chile. The research included several data search sources, for the purposes of triangulation and data corroboration. The bibliographic survey on digital platforms considered secondary data sources and articles published on the Scopus and Web of Science platforms about information on the hydrogen economy and development. In the Power to Mobility context, to form an adequate ecosystem it is necessary to have incentive policies for the electromobility sector, strategic vehicles for the country and supply infrastructure. By analyzing initiatives from countries that have implemented policies and strategies that favor experience in the electric and FCEV market, it was possible to analyze that the Asian continent, North America, Europe and Oceania are the best regions to evaluate international experiences related to public policies for the use of hydrogen in mobility. It was observed that in Brazil there are still gaps in the regulation of hydrogen in production, storage and use. The market for electric vehicles and FCEVs is related to the development of public policies, as hydrogen-powered vehicles have emerging technology, and government incentive initiatives are ways of suggesting ways to establish clear national criteria and analyze possible possibilities for electric mobility in Brazil.

Key words: hydrogen; renewable energy; hydrogen regulation; green hydrogen; public policies, infrastructure; electromobility.

6. Referências

BIOMASS MAGAZINE. Disponível em:<
<https://biomassmagazine.com/articles/19308/shell-announces-partnership-to-convert-ethanol-into-hydrogen>> Acesso em abril de 2023.

FCHO. Disponível em
<<https://www.fchobservatory.eu/observatory/policy-and-rcs/national-policies/fuel-cell-electric-vehicles-fcevs-incentives>>. Acesso em abril de 2023.

FINEP. Disponível em: < <http://finep.gov.br/noticias/todas-noticias/5045-desafios-para-a-implantacao-de-onibus-a-hidrogenio-sao-debatidos-na-Finep>>. Acesso em abril de 2023.

NISSAN MOTOR CORPORATION. Disponível em: <[Nissan e Unicamp assinam contrato para estudar as tendências e o uso do bioetanol na mobilidade elétrica \(nissannews.com\)](#)>. Acesso em maio de 2023.

POWER TECHNOLOGY RESEARCH. **Compreendendo o papel das políticas governamentais no apoio ao crescimento da mobilidade do hidrogênio.** 2023. Disponível em:<
<https://powertechresearch.com/understanding-the-role-of-government-policies-in-supporting-the-growth-of-hydrogen-mobility/>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2023.

FABRICAÇÃO DE REATORES DE PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO: MANUAL DE PROCEDIMENTOS

Autor: João José Moura Vieira (Universidade Federal do Ceará - UFC)

Co-Autores:

Breno Brito de Andrade (Universidade Federal do Ceará - UFC); Hariel Abreu Pereira (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE); Auzuir Ripardo de Alexandria (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE).

Resumo:

O atual contexto global demanda por fontes alternativas de energia em detrimento dos combustíveis fósseis, sobretudo o petróleo. As energias renováveis atuam como principal veículo da transição energética, sendo uma das principais dificuldades para sua implementação, a ineficiência do transporte em grandes distâncias. Nesse tocante, o hidrogênio atua como vetor energético de alta densidade, contribuindo para o armazenamento e distribuição de energias renováveis intermitentes, além de diversas aplicações semelhantes às do petróleo na indústria. Vale ressaltar que o Hidrogênio não é encontrado na natureza em sua forma pura, necessitando do consumo de alguma fonte primária para sua obtenção. Nesse sentido, o hidrogênio “musgo”, isto é, hidrogênio produzido em processos de digestão anaeróbia utilizando biomassa, configura-se como uma das rotas tecnológicas mais promissoras, já que, em muitos casos, é capaz de atuar como sumidouro de CO₂ da atmosfera. No entanto, por utilizar o metabolismo de seres anaeróbios, principalmente bactérias e algas, os reatores de produção de Hidrogênio Musgo demandam diversos requisitos de design para garantir um ambiente interno inerte e vedado. Nesse contexto, este trabalho propõe um manual de procedimentos para a fabricação de reatores de produção de hidrogênio, utilizando como base uma Célula de Eletrólise Microbiana de 300 mL. Dessa forma, pretende-se elucidar o procedimento de utilização de Resina Epóxi, suas características, requisitos e condições para a materialização de outros reatores semelhantes.

Palavras-Chave: Biohidrogênio; Impressão 3D; Fabricação de Reatores.

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização humana, a utilização da energia esteve atrelada ao desenvolvimento das sociedades. Quanto maior a quantidade de energia disponível, maior a capacidade de crescimento e desenvolvimento de uma determinada população (CARVALHO, 2014).

Com a constante evolução tecnológica, houve um aumento da necessidade da descoberta e utilização de novas fontes de energia. O que teve início com tração humana e animal, evoluiu gradualmente, até que, com a primeira revolução industrial, a energia advinda de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, tornou-se a mais utilizada, o que se expande até os dias atuais, com o uso do petróleo (CARVALHO, 2014).

Segundo Silva (2019, p. 144),

"Entre outras commodities existentes, o petróleo exerceu crescentemente um papel central, sendo considerado um dos mais importantes recursos naturais existentes. De facto, comparando com outros recursos fósseis, tais como o carvão e o gás natural, o petróleo é mais potente, fácil de transportar, armazenar e capaz de ser transformado em diferentes produtos (combustível e produtos)".

Diante disso, é possível entender a crescente influência que o petróleo teve a partir da segunda revolução industrial, ocorrida no século XX. A sua facilidade no transporte, somada a vasta gama de produtos produzidos por derivados do petróleo, fizeram desse combustível o principal vetor energético do século passado. (SILVA, 2019) Entretanto, como todos os outros combustíveis fósseis, a utilização do petróleo vem atrelada a grandes emissões de diversos gases nocivos à atmosfera, com um grande destaque, o Dióxido de Carbono (CO₂), gás potencializador do efeito estufa. (DRUMM et al., 2014).

Nesse tocante, visando reduzir a influência dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial, diversos países adotaram políticas econômicas que incentivam o uso de energias limpas, sustentáveis e advindas diretamente do meio ambiente, que comumente são referidas como Energias Renováveis, a exemplo das fontes solar e eólica. (SILVA, 2019).

No entanto, apesar desse incentivo governamental e do alto potencial de geração de energia, essas fontes renováveis têm uma grande desvantagem quando comparadas ao petróleo, visto que a sua distribuição ocorre em forma de energia

elétrica, feito por cabeamento, o que, em comparação à versatilidade do petróleo, não é viável economicamente para longas distâncias, sobretudo entre continentes. Dessa maneira, o excedente energético de locais com alta capacidade de produção, como o Brasil, não pode ser transmitido diretamente à Europa, por exemplo, que, por sua vez, possui baixa capacidade de geração por fontes renováveis associado a um alto consumo.

Portanto, como uma forma de contemplar esse continente e poder abastecê-lo de energia elétrica renovável, outras alternativas que suscitam o problema anteriormente citado, atrelado ao problema da exportação, tiveram que ser desenvolvidas, como é o caso do hidrogênio verde. Sendo esse, um gás bastante promissor em função da sua nula emissão de gás carbônico para a atmosfera, ao mesmo passo que funciona como um vetor energético, do qual possui alta eficiência em utilizações industriais e combustíveis, em detrimento da utilização de fontes fósseis (BEZERRA, 2021).

Atualmente, o hidrogênio e suas formas de geração para utilização nos mais diversos meios de produção tem sido uma pauta muito discutida e fomentada, principalmente como um viés na contribuição do avanço das energias renováveis. Dessa forma, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2021), “o mercado de hidrogênio ganhará momentum a partir de políticas energéticas pós-pandemia para a retomada da economia e para acelerar a transição energética em diversos países”. Tais esforços governamentais e empresariais em todo o mundo estão sendo destinados ao desenvolvimento dessa classificação de hidrogênio ecologicamente sustentável, denominado “hidrogênio verde”, que utiliza de energia elétrica oriunda de fontes de energias renováveis para sua formação, a partir do processo físico-químico da eletrólise da água, comumente utilizando as fontes solar fotovoltaica e eólica *onshore* ou *offshore*

Diante disso, vale destacar que o hidrogênio verde anteriormente comentado e que hoje em dia está no foco de desenvolvimento de diversas partes do mundo não possui a coloração verde, sendo este um gás incolor. A utilização do nome “verde” é denotada para classificar sua forma de produção, e diferenciá-la das demais rotas de geração do hidrogênio. Dessa maneira, o denominado “arco-íris do hidrogênio” foi desenvolvido como forma de abranger todas essas classificações de formas de produção do H₂ por uma escala de cores, e que perpassa desde o

“hidrogênio preto”, produzido por gaseificação do carvão mineral do tipo antracito, até o “hidrogênio rosa”, produzido por fonte de energia nuclear. (EPE, 2021)

Assim, como representação do arco-íris do hidrogênio abordado no parágrafo anterior, sua escala de cores é exposta a seguir pela Figura 1.

Figura 1: Arco-Íris do Hidrogênio.

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
■	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: EPE, 2021

Já com relação à biomassa, configura o método conhecido como “hidrogênio musgo”. Quando essa biomassa é submetida a determinados processos biológicos, o hidrogênio passa a ser chamado de biohidrogênio, um ramo do hidrogênio musgo, que possui a grande vantagem de um perfil líquido de emissões negativo, isto é, retira gases de efeito estufa da atmosfera durante a produção do Hidrogênio, sobretudo quando comparado à ausência da aplicação desses métodos. Além disso, também é comum associar o biohidrogênio a um menor consumo de energia em relação aos demais processos. Em síntese, há três bioprocessos principais, a saber: biofotólise, que pode ser direta ou indireta; fermentação, subdividindo-se em fotofermentação e fermentação escura e eletrólise microbiana. (SIVARANJANI et al., 2023).

A eletrólise microbiana insere-se no ramo das tecnologias bioeletroquímicas, isto é, utiliza as reações de oxirredução para a geração de produtos de alto valor, como o hidrogênio. Nesse sentido, uma Célula de Eletrólise Microbiana (MEC, do inglês *Microbial Electrolysis Cell*) promove tanto a produção do gás hidrogênio quanto a redução da carga orgânica de um substrato. As MECs são dispositivos movidos por meio da digestão anaeróbia de bactérias exoeletrogênicas, isto é, capazes de produzir prótons (H⁺) e elétrons (e⁻) ao oxidar a matéria orgânica presente em um substrato, alocadas em uma câmara com um eletrodo (ânodo), também chamada de câmara anódica. (LOGAN, 2008).

Embora seja uma alternativa promissora, a produção em larga escala de hidrogênio ainda enfrenta desafios, especialmente em relação aos custos operacionais que, atualmente, não são competitivos quando comparados às vias tradicionais de produção do hidrogênio. No entanto, a biotecnologia pode ser uma aliada para viabilizar os processos associados ao biohidrogênio, independentemente da via de produção, algumas pesquisas visam aumentar o rendimento e reduzir os custos do processo, incluindo o *design* dos reatores, a seleção de microrganismos com maior capacidade produtiva e a engenharia genética e metabólica para otimizar as rotas de produção do hidrogênio.

No âmbito do *design* dos reatores, devido à geração de biohidrogênio estar associada ao metabolismo bacteriano, uma das problemáticas enfrentadas consiste na composição estrutural dos dispositivos, visto que, as estruturas metálicas comuns em reatores químicos convencionais acarreta em uma série de problemas, como a bioincrustação, a contaminação das paredes, as perdas por transferência de massa e, principalmente, a estabilidade do inóculo. (Fudge *et al.*, 2021).

Vale ressaltar que reatores produtores de hidrogênio deparam-se frequentemente o processo conhecido como "fragilização por hidrogênio", fenômeno resultante do diminuto tamanho da molécula de hidrogênio, com alta capacidade de permeação pela rede cristalina dos materiais e ligas utilizados em diversos projetos de engenharia, resultando no vazamento do gás.(FERREIRA, 2007). Nesse aspecto, reatores de biohidrogênio necessitam ser inertes e resistentes à fragilização por hidrogênio, fazendo necessária a aplicação de materiais como a Resina Epóxi, Fibras de Vidro e outras composições que confirmam resistência à tais condições.

2 OBJETIVOS

Diante do exposto, este trabalho possui como objetivo geral a composição de um manual de fabricação de reatores inertes destinados à produção de biohidrogênio, utilizando o relato de experiências baseado na materialização de um protótipo de MEC.

Nesse sentido, concomitantemente, foram delineados os seguintes objetivos específicos para a efetivação da proposta deste trabalho:

a) Idealizar, com base em pesquisas bibliográficas, a configuração do reator MEC utilizado como modelo para a execução dos procedimentos de manufatura;

b) Dimensionar e projetar, utilizando recursos de *software*, o protótipo de reator em formatação adequada à manufatura aditiva em impressão 3D;

c) Efetivar a impressão em 3D das peças (positivo), bem como a materialização dos moldes (negativo) em borracha de silicone líquida, além da modelagem em resina epóxi;

d) Confeccionar um manual de procedimentos, explicitado neste trabalho, para elucidar, minuciosamente, as etapas padrão direcionadas à adoção para reatores inertes em geral, compreendendo desde o esboço até a materialização;

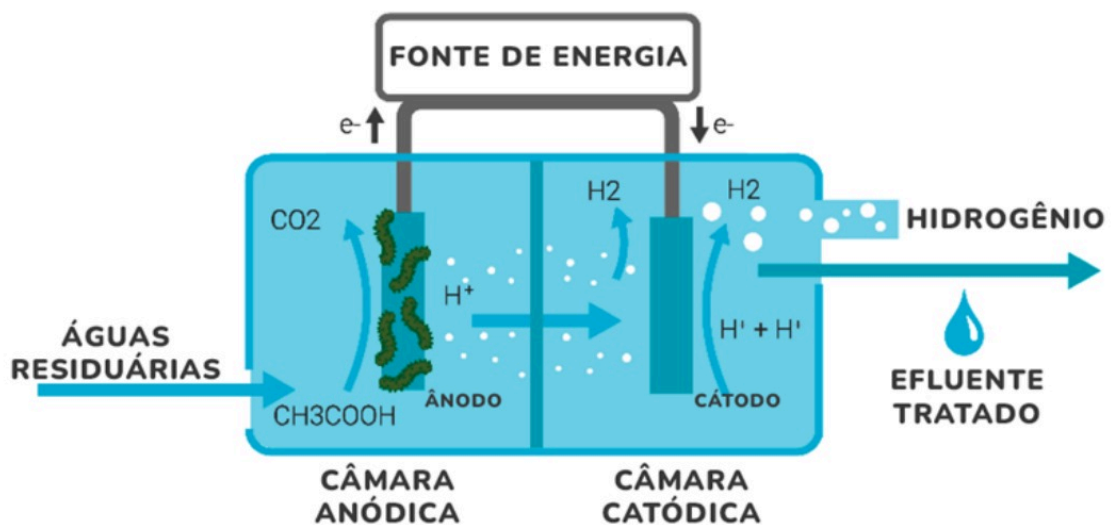
3 MATERIAIS E MÉTODOS

No intuito de cumprir as metas estabelecidas neste trabalho, propõe-se uma abordagem em quatro etapas, a saber: Projeto básico e Modelagem 3D; Impressão dos Moldes; Modelagem do reator em Resina Epóxi; Adequações e Acabamento.

3.1 Projeto Básico e Modelagem 3D

Para a idealização do projeto básico, foi realizada uma revisão bibliográfica, com o intuito de nivelar os conhecimentos acerca de reatores inertes e o funcionamento das MECs, que será base para a realização dos procedimentos adotados neste trabalho. Uma configuração comum para esses dispositivos é apresentada na Figura 2, que esclarece o diagrama de funcionamento básico de uma MEC, em que é possível observar, de maneira objetiva, o reator em câmara dupla, em virtude das reações eletroquímicas de oxirredução que ocorrem em seu interior, ou seja, câmara anódica e câmara catódica, além da separação por membrana.

Figura 2: Funcionamento Básico de uma MEC



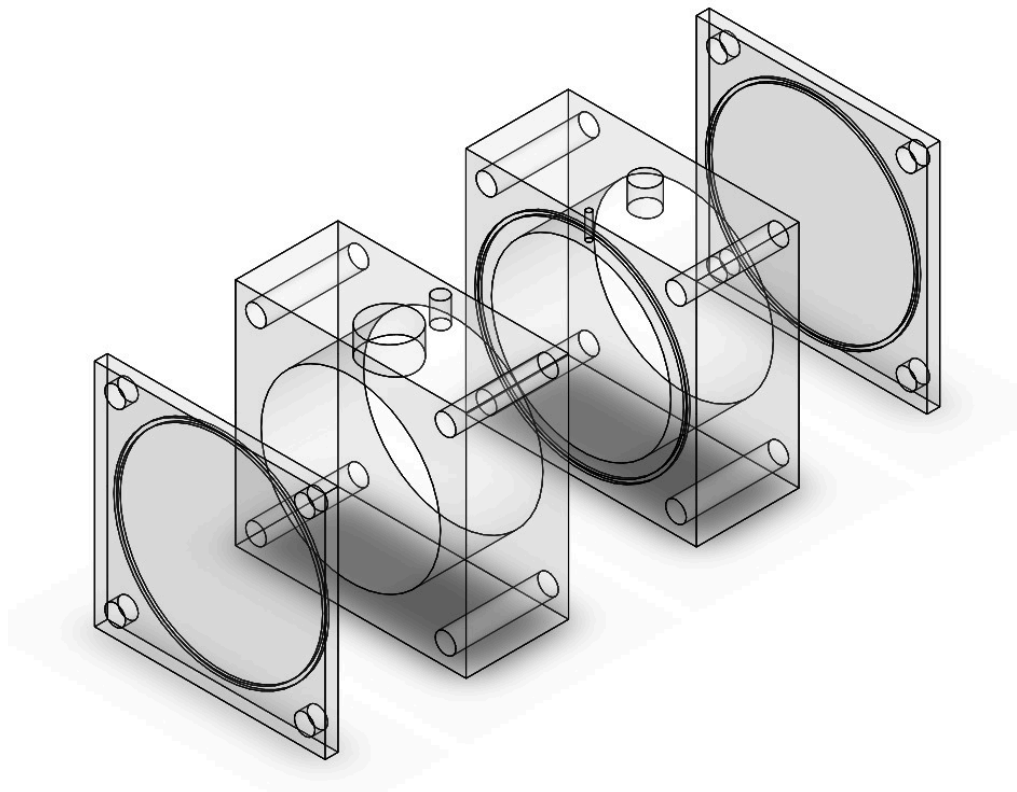
Fonte: Adaptado de Fudge, T. *et al.* (2021).

Dessa maneira, em virtude da presença da membrana de separação entre dois meios preenchidos com líquidos, um dos grandes impasses nesse tipo de reator é a vedação.

Assim, foi esboçado o projeto básico do reator de eletrólise microbiana em análise neste trabalho por meio do *SolidWorks®*, da desenvolvedora *Dassault*

Systèmes S.A, software de desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design*), responsável por auxiliar o projetista na concepção de expressões gráficas tridimensionais, com a possibilidade de exportação no formato **.stl** (do inglês *Standart Triangle Language*), isto é, um formato de arquivo 3D dividido em camadas bidimensionais triangulares, que podem ser lidos por softwares de fatiamento como o Cura®, desenvolvido pela *Ultimaker*, cuja principal função é a conversão do arquivo em **.stl** para o formato **.gcode**, que, por sua vez, contém as instruções para diversos modelos de impressoras 3D pré-instaladas no Cura, guiando os seus componentes, sobretudo os motores para a ideal impressão da peça, isto é, um procedimento de Manufatura Aditiva, adicionando camadas do material sobre uma superfície de trabalho. Nesse sentido, a Figura 3 permite a visualização isométrica da Célula de Eletrólise Microbiana que baseou este estudo.

Figura 3: Reator de Biohidrogênio: Visualização Isométrica



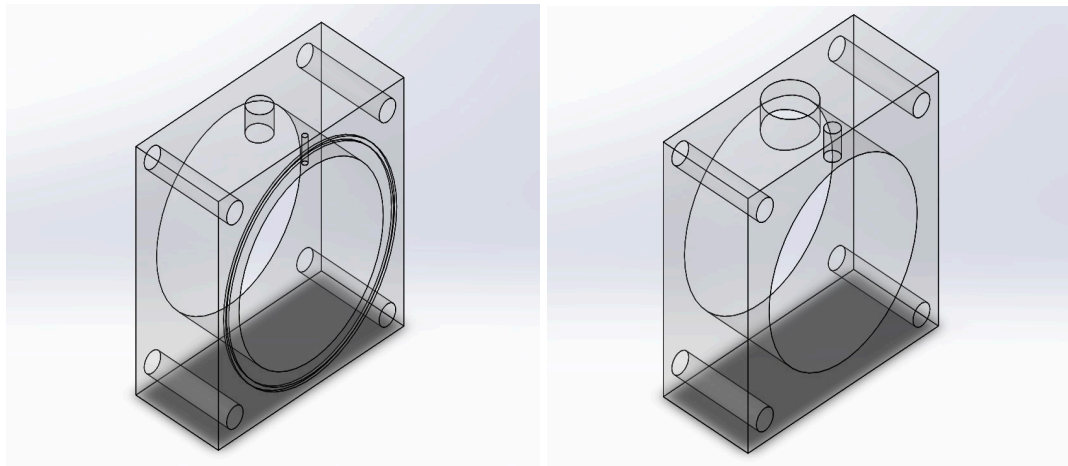
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse tocante, visando ao melhor desempenho possível do reator, foram elaborados quatro desenhos representativos das peças, que juntas compõem a MEC proposta, essas peças devem ser fixadas por meio de parafusos. Em vista

disso, é possível notar nas extremidades de cada peça as quatro perfurações de 8 milímetros de diâmetro destinadas à essas estruturas de fixação.

As peças localizadas nas extremidades, são idênticas, isto é, só necessitam de um molde, e foram chamadas de “capas”, com dimensões de 90 por 90 milímetros, e espessura de 5 milímetros. Essas capas contém um fenda circular com 66 milímetros de diâmetro externo e 64 milímetros de diâmetro interno para a inserção de anéis de vedação de borracha, comumente referidos como “o-rings”, visando à estanqueidade do reator.

Figura 4: Reator de Biohidrogênio: Câmaras anódica (esquerda) e catódica (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A câmara anódica, localizada à esquerda da Figura 4, é o local de inoculação das bactérias exoeletrogênicas e da presença do ânodo, contendo dimensões de 90 por 90 milímetros, e espessura de 40 milímetros. Nela, estão presentes: o centro da câmara, com 70 milímetros de diâmetro, o furo para a entrada do ânodo, com 2,20 milímetros de diâmetro, o orifício para entrada do substrato orgânico com a biomassa fonte do Hidrogênio, com 10 milímetros de diâmetro, além de uma fenda circular semelhante para a inserção do anel de vedação central.

Por fim, a câmara catódica, localizada à direita da Figura 4, é o meio em que ocorre a Reação de Evolução do Hidrogênio neste dispositivo, especialmente pela presença do cátodo, sendo composta de dimensões semelhantes às da câmara anódica. Nela, estão contidos o centro da câmara, com 70 milímetros de diâmetro, um furo para a entrada do cátodo, com 6 milímetros de diâmetro e um orifício para a retirada do hidrogênio, com 20 milímetros de diâmetro.

Com o objetivo de atingir a menor distância entre os eletrodos, os orifícios feitos entre as câmaras da Figura 4, tinham a idealização da proposta de “zero gap”, em que as posições do ânodo e do cátodo devem ser separadas pela menor distância possível, uma vez que isso proporciona menores perdas ôhmicas e por transferência de massa, maior eficiência energética e a possibilidade de operar em menor tensão (PLETCHER; LI, 2011).

3.2 Impressão 3D e Moldes

A segunda parte deste estudo envolveu vasto aparato de impressão 3D, utilizou-se, para isso, dos recursos do Laboratório “Oficinas 4.0” do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará (IFCE) - *Campus* do Benfica para confecção do molde. Este foi executado a partir da impressora “Ender 3 V2”, com configurações básicas representadas na Tabela 1, empregando o polímero do tipo poliacido láctico (PLA), polímero biodegradável advindo de fontes renováveis, vastamente utilizado para a produção de utensílios domésticos e impressões 3D, como filamento de impressão. (OLIVEIRA; BORGES, 2020)

Tabela 1: Especificações Técnicas: Ender 3 V2

Especificação	Detalhes
Modelo	Creatility Ender 3 V2
Tecnologia de Impressão	Fused Deposition Modeling (FMD)
Volume de Impressão	220mm x 220mm x 250mm
Precisão de impressão	± 0,1 mm
Velocidade de impressão	Até 180mm/s
Materiais Suportados	PLA, ABS, TPU, PETG e mais
Extrusora	Bico único MK8
Diâmetro do Bico	0,4mm (Substituível)
Software de Fatiamento	Cura, Simplify3D, PrusaSlicer e outros
Dimensões	475mm x 470mm x 620mm
Peso	9kg
Fonte de Alimentação	24V,270W (Fonte de Alimentação Certificada)

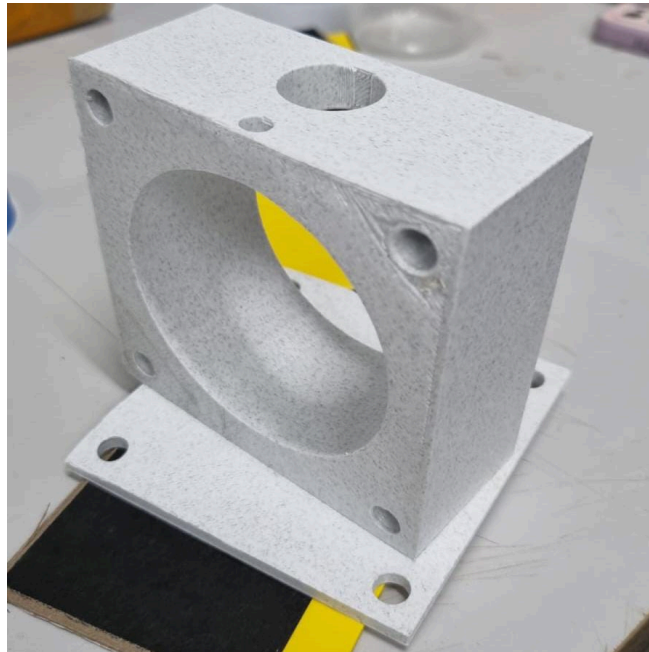
Fonte:GTMax3D - Impressoras 3D

Com o arquivo do projeto em **.gcode**, foram impressas as quatro peças no intervalo de dois dias. As capas foram produzidas em cerca de quatro horas cada,

enquanto as câmaras, anódica e catódica, levaram ambas, em média, dezoito horas para a sua confecção.

Por fim, realizou-se um teste de vedação com o molde impresso, em que foi verificado que o material da impressão 3D não conferia as características de vedação adequadas ao processo de eletrólise microbiana, além disso, o material PLA é um plástico biodegradável, que, com o passar do tempo, também seria consumido pelas bactérias no interior desta célula e de outros reatores para produção do biohidrogênio. Também foi notória a presença de microfissuras entre as camadas impressas, o que poderia facilitar a formação de biofilme bacteriano distante do eletrodo, reduzindo a eficiência energética do dispositivo. A Figura 5 evidencia o resultado final das peças impressas em 3D.

Figure 5: Câmara catódica e capa, em filamento PLA



Fonte: Elaborado pelo autor

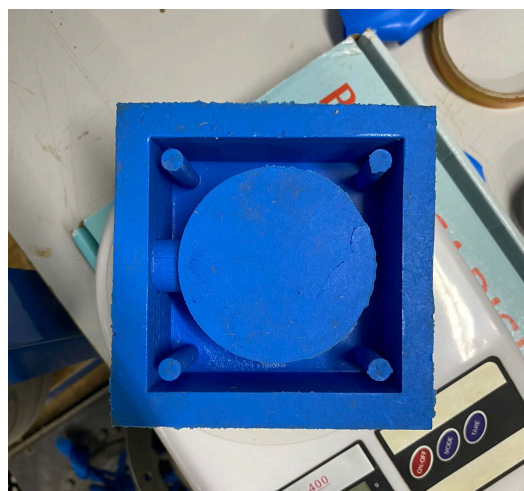
3.3 Modelagem em Resina Epóxi

Para a terceira seção deste estudo, todos os procedimentos foram realizados nas instalações do Laboratório de Combustão, Energias Renováveis e Hidrogênio do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, em que foi possível contar com a infraestrutura e os equipamentos básicos para a efetivação da fabricação dos reatores, a exemplo de vidrarias, misturadores e locais para a secagem das resinas.

Inicialmente, foram confeccionadas caixas retangulares de papel cartão para a fixação das peças 3D. Em seguida, foi aplicado o desmoldante, substância responsável por auxiliar na retirada do molde de silicone (posterior ao processo de cura), na superfície das peças. Após isso, preparou-se a borracha de silicone, dissolvendo 15g do catalisador, composto por uma solução de ésteres e estanho, em 500g de borracha. O processo de mistura consistiu em utilizar uma espátula de madeira, em um recipiente separado, para homogeneizar a solução, que inicialmente apresentava elevada viscosidade, até a viscosidade ideal, cuja consistência se assemelhava a de um líquido, com algumas pequenas bolhas de ar na parte superior. Dessa forma, a solução foi reservada durante 30 minutos para liberar o excesso de ar em seu interior, aumentando a fidelidade dos detalhes do molde.

Posteriormente, a solução foi depositada, individualmente, nas peças impressas, tal que a faixa de líquido derramada fosse muito fina, para diminuir a formação de bolhas de ar, sendo o depósito de solução em ambas as câmaras de 175g, e em cada uma das capas de 75g. Em seguida, com todas as peças envoltas por silicone, os moldes ficaram reservados por 20 horas, à temperatura ambiente, para ocorrer o processo de cura. Por fim, os moldes negativos, devidamente concluídos, foram retirados das peças 3D, ficando separados para serem utilizados mais à frente no estudo.

Figura 6: Molde da Câmara Anódica,



Fonte: Elaborado pelo autor.

Então, utilizou-se de resina epóxi, um polímero termofixo que se enrijece ao ser misturado com um agente catalisador chamado “endurecedor” (AG Resinas, s.d.), para execução do reator. Uma vez que essa resina é caracterizada como uma substância tóxica, foi necessária a utilização de equipamentos de segurança adequados, como luvas e máscara de proteção, para seu manuseio de forma adequada.

Após isso, foi adicionada a resina epóxi e o endurecedor, com proporção de 2:1, respectivamente, em um recipiente externo para ser feita a mistura entre os dois líquidos com o auxílio de uma espátula de madeira. Sendo o ideal estado homogêneo identificado no momento em que a coloração antes translúcida da resina estivesse com um aspecto transparente. Terminado esse processo, adicionou-se tal mistura ao molde negativo, de forma cuidadosa por meio de um fino filete do líquido para que não houvesse a formação de bolhas. Sendo repetido esse processo para todas as quatro peças do reator, em que possuíram ambas as câmaras 150 gramas e ambas as capas 50 gramas.

Por fim, após o processo de cura de 20 horas, à temperatura ambiente, as peças foram removidas do molde negativo, estando assim finalizada a confecção das partes do reator.

3.4 Adequações e acabamento

Esta etapa do estudo consistiu no aperfeiçoamento e acabamento do reator. Inicialmente, com o intuito de tornar a célula mais maneável e transparente, foi realizado um polimento com lixas no seu exterior. Em seguida, como mostrado na figura 7, foram comprados: quatro parafusos com diâmetro de 8 milímetros; quatro porcas com diâmetro de 8 milímetros; três “*o-rings*” com diâmetro de interno de 64 milímetros e externo de 66 milímetros; um cátodo, constituído de uma malha circular de platina, com haste de *Teflon*®; um anodo, composto por cerdas de grafite, no formato de uma escova, com haste de titânio; uma membrana PEM, do inglês *proton-exchange membrane* (PEM), com espessura de 164 micrômetros.

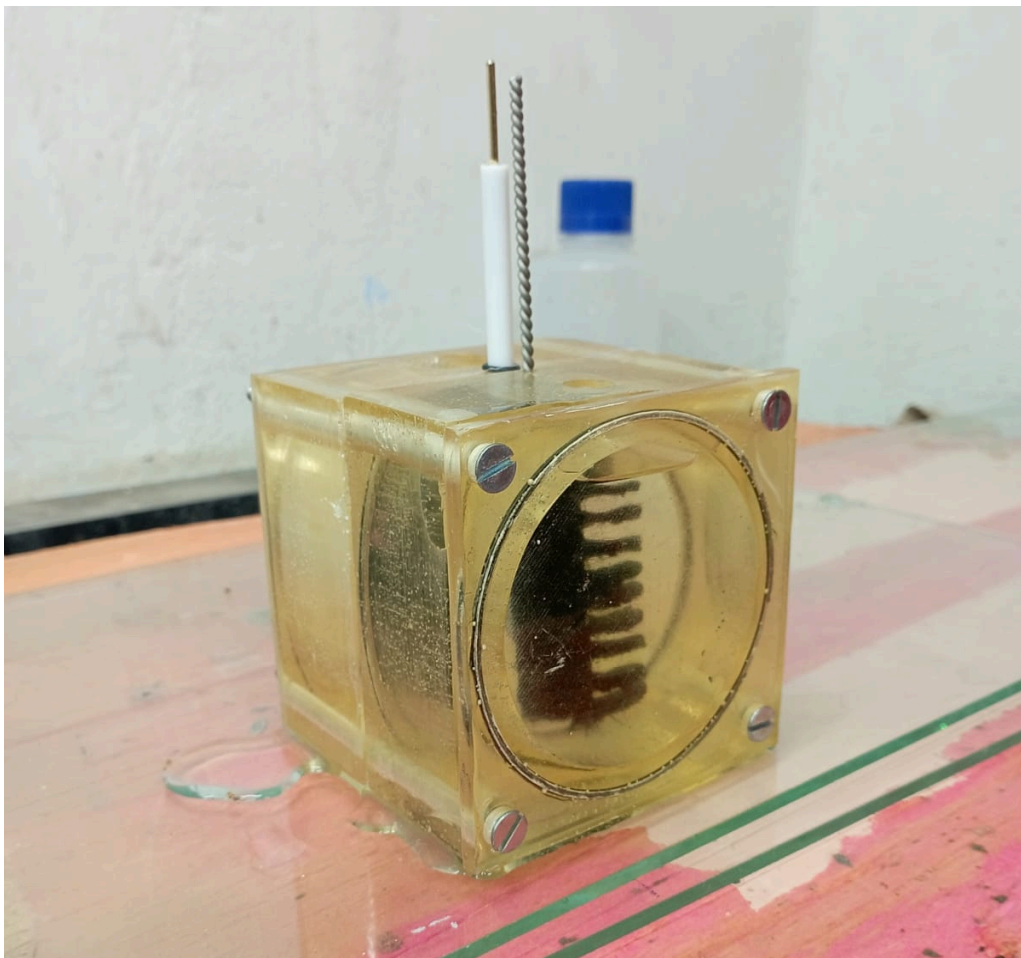
Por fim, todos os componentes foram estruturados em seus respectivos orifícios, como explicitado no tópico 3.1, finalizando, assim, a montagem do reator, como mostrado na Figura 8.

Figura 7: Componentes do reator de biohidrogênio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8: Teste de vedação com reator concluído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante da realização do estudo e da prática abordados neste projeto, pode-se afirmar que houve êxito no que foi inicialmente definido como diretrizes do presente trabalho. Assim, foi apresentada a pesquisa realizada para o nivelamento dos conceitos básicos sobre a teoria acerca do funcionamento da célula de eletrólise microbiana, para com base nisso possibilitar o desenvolvimento prático proposto. Sendo este de suma importância, ao fundamentar os conhecimentos que posteriormente foram idealizados na configuração do reator.

Com isso, o projeto básico do protótipo foi executado com o auxílio da ferramenta *SolidWorks*® que possibilitou a criação do molde em 3D após as etapas de Manufatura Aditiva baseadas em impressão 3D, sobretudo com o auxílio do *software Cura*®. No entanto, a manufatura com filamentos de PLA não conferia, ao reator que este trabalho se baseia, as características necessárias, sobretudo com relação à vedação, que compromete o seu funcionamento.

Para solucionar tal problemática, desenvolveu-se a alternativa de utilizar o molde de PLA para a fabricação de um molde negativo em borracha líquida de silicone, possibilitando a criação, a partir desse, do molde definitivo de Resina Epóxi, sendo crucial para o desenvolvimento do projeto, uma vez que isso propiciou a resolução dos problemas de vazamento e, conseqüentemente, o bom desempenho e eficiência do reator. A partir de toda a prática realizada para a execução do protótipo de MEC, foi possível elaborar tal manual, instruindo e elucidando todas as etapas envolvidas nesse processo. Com bom nível de registro e detalhes, compreendeu-se a necessidade da publicação deste trabalho para basear futuros projetos similares, além de poder contribuir de forma positiva para o avanço dos estudos acerca do Hidrogênio Musgo, e assim, da nova matriz energética em estruturação.

Sob essa ótica, ressalta-se que o procedimento adotado neste estudo pode ser replicado para a fabricação de reatores inertes de pequeno porte, tendo como características principais o bom nível de controle sobre o formato do reator, dada a versatilidade do projeto tridimensional oferecida na etapa de projeto básico, a fidelidade a esses detalhes em virtude das técnicas de manufatura aditiva e modelagem, além dos benefícios da utilização da Resina Epóxi, como a estabilidade, a resistência, o baixo custo e o aspecto final do reator.

Ademais, as principais dificuldades encontradas foram: à falta de experiência com trabalhos artesanais na Engenharia; o alto número de etapas que devem ser minuciosamente seguidas para o resultado ideal; a necessidade de experiência prévia com esse tipo de modelagem, que, muitas vezes, encontra-se restrita ao campo comercial, como na produção de chaveiros. Nesse aspecto, ressalta-se a tentativa mal sucedida de compor este reator por outras técnicas, como Manufatura Subtrativa em acrílico por meio de máquinas do tipo fresa, fabricação das peças em vidro e outras possibilidades em que a barreira de custo impossibilitou sua efetivação.

Em conclusão, este trabalho buscou salientar a importância do hidrogênio, sobretudo o biohidrogênio, no contexto de transição energética global, além de deixar explicitado a possibilidade de produzir, de maneira artesanal e acessível, um reator deste vetor energético. Nesse aspecto, o intuito principal era repassar as experiências acerca da confecção de uma célula MEC, com o fito de incentivar outras pesquisas e relatos de casos sobre essa área, ainda pouco expressiva na literatura científica brasileira.

MANUFACTURING OF BIOHYDROGEN PRODUCTION REACTORS: PROCEDURES MANUAL

Abstract:

The current global context demands alternative sources of energy instead of fossil fuels, especially oil. Renewable energies act as the main driver of the energy transition, with the main drawback being the inefficiency of long-distance transportation. In this regard, hydrogen serves as a high-density energy vector, contributing to the storage and distribution of intermittent renewable energies, as well as various applications similar to those of oil in the industry. It is worth noting that Hydrogen is not found in nature in its pure form and requires the consumption of some primary source for its production. In this sense, "moss" hydrogen, produced in anaerobic digestion processes using biomass, emerges as one of the most promising technological routes since, in many cases, it can act as a sink for CO₂ from the atmosphere. However, as it utilizes the metabolism of anaerobic organisms, mainly bacteria and algae, Moss Hydrogen production reactors require various design requirements to ensure an inert and sealed internal environment. In this context, this work proposes a procedures manual for the fabrication of hydrogen production reactors, using a 300 mL Microbial Electrolysis Cell as a basis. Thus, the intention is to elucidate the procedure for using Epoxy Resin, its characteristics, requirements, and conditions for the realization of other similar reactors.

Keywords: Biohydrogen; 3D Printing; Reactor Manufacturing.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA, F. D. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. **Centro de Desenvolvimento e Estudos Estratégicos do Banco do Nordeste**, Fortaleza, v. 212, dez. 2021. Disponível em: https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1109/1/2021_CDS_212.pdf. Acesso em: 05 dez. 2024.

CARVALHO, J. F. Energia e sociedade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 28, n. 82, p. 13-30, dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/GYqnmvDvtGtr8N5zdsYdj5j/?lang=pt>. Acesso em: 05 fev. 2024.

DRUMM, F. C.; GERHARDT, A. E.; FERNANDES, G. D.; CHAGAS, P.; SUCOLOTTI, M. S.; KEMERICH, P. D. C. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 122-133, abr. 2014. DOI: 10.5902/2236117010537. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117010537>. Acesso em: 04 fev. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Nota Técnica: Hidrogênio. Rio de Janeiro: EPE, 2023. 112 p. (Série Estudos Prospectivos, n. 569).

FERREIRA, P. F. P. Infra-estrutura para uso energético do hidrogênio: estações de abastecimento para veículos com células a combustível. 2007. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2007. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2007.440581. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2007.440581>. Acesso em: 09 fev. 2024.

FUDGE, T.; BULMER, I.; BOWMAN, K.; PATHMAKANTHAN, S.; GAMBIER, W.; DEHOUCHE, Z.; AL-SALEM, S. M.; CONSTANTINOU, A. Microbial electrolysis cells for decentralised wastewater treatment: The next steps. **Water**, v. 13, n. 4, 2021. ISSN 2073-4441. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/4/445>.

GTMAX3D. (2023). **Soluções em 3D**. Fortaleza, CE: GTMAX3D. Disponível em: <https://www.gtmax3d.com.br/>. Acesso em: 08 fev. 2024.

LOGAN, B. E. **Microbial Fuel Cells**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2008

OLIVEIRA, A. C. S.; BORGES, S. V. Poli (Ácido Lático) Aplicado para Embalagens de Alimentos: Uma Revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 15, n. 1, p. 1-10, jul. 2020. Disponível em:

<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/view/713/501>.

Acesso em: 08 fev. 2024.

PLETCHER, D.; LI, X. Prospects for alkaline zero gap water electrolyzers for hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 23, p. 15089-15104, nov. 2021. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.08.080. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319911020015?via%3Dihub>. Acesso em: 07 fev. 2024.

SANTOS, F. M. Transição energética: enquadramento e desafios. **Vídere: Revista da Faculdade de Direito da Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, v. 11, n. 22, p. 112-126, dez. 2019. DOI: 10.30612/videre.v11i22.11217. Disponível em:

<https://doi.org/10.30612/videre.v11i22.11217>. Acesso em: 04 fev. 2024.

SIVARANJANI, R.; VEERATHAI, S.; JENIFER, K. J.; SOWMIYA, K.; RUPESH, K. J.; SUDALAI, S.; ARUMUGAM, A. A comprehensive review on biohydrogen production pilot scale reactor technologies: Sustainable development and future prospects.

International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 62, p. 23785-23820, jul. 2023.

DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.161. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923012314?via%3Dihub>. Acesso em: 06 fev. 2024.

ROTAS TECNOLÓGICAS PARA METANAÇÃO DO CO₂: ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS PARA CAPTURA DE CARBONO E USO DO HIDROGÊNIO

Autor: Ana Carolina Miranda Magalhães (Universidade Federal do Ceará - UFC)

Co-Autores: Bruno Rafael Morais da Silva (Universidade Federal do Ceará - UFC);

Everton Bezerra Gadelha Filho (Universidade Federal do Ceará - UFC);

Hariel Abreu Pereira (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE);

William Magalhães Barcellos (Universidade Federal do Ceará - UFC);

Responsável pela apresentação: Ana Carolina Miranda Magalhães

RESUMO

A Agência Internacional de Energias Renováveis estabeleceu a necessidade de reduzir 36,9 gigatoneladas de CO₂ até 2050 para cumprir os objetivos do Acordo de Paris, principalmente substituindo combustíveis fósseis por energias renováveis. No entanto, no Brasil, há desafios de acessibilidade a recursos energéticos em áreas rurais e falta de uma rede de distribuição de Gás Natural. O país possui potencial para produção de Biogás, o que poderia promover independência energética. Entretanto, o aproveitamento energético desses resíduos ainda é incipiente. Este trabalho visa caracterizar as rotas químicas de produção de Gás Natural Renovável, descrevendo os principais atores (Reatores e Catalisadores) analisando parâmetros como pressão, temperatura, eficiências e demanda de insumos. A Reação de Metanação é aqui explorada a partir do estudo desses dois componentes principais de uma planta industrial. A busca bibliográfica seguirá a estratégia PICO simplificada adaptada para Engenharias. Os resultados obtidos incluem quadros comparativos entre os reatores de metanação: Leito Fixo; Monólito; Microcanal; Membrana; Melhorados por Sorção; Leito Fluidizado, e os mecanismos de catálise: Termocatalíticos; Eletrocatalíticos; Biocatalíticos; Fotocatalíticos; e Plasmacatalíticos, considerando seus parâmetros operacionais. Pretende-se, então, estabelecer um rol de rotas tecnológicas de Metanação do CO₂ caracterizadas por parâmetros pertinentes, a exemplo do Nível de Maturidade Tecnológica e da relação Custo/Efetividade.

Palavras-Chave: Metano Sintético; Captura de Carbono; Hidrogênio Verde; Gás Natural Renovável.

ABSTRACT

The International Renewable Energy Agency has established the need to reduce 36.9 gigatons of CO₂ by 2050 to meet the goals of the Paris Agreement, primarily by replacing fossil fuels with renewable energy sources. However, in Brazil, there are challenges in accessing energy resources in rural areas and a lack of a natural gas distribution network. The country has potential for biogas production, which could promote energy independence. However, the energy utilization of these residues is still in its early stages. This work aims to characterize the chemical routes of renewable natural gas production, describing the main actors (reactors and catalysts) and analyzing parameters such as pressure, temperature, efficiencies, and input demands. Methanation reaction is explored here based on the study of these two main components of an industrial plant. The literature search will follow the simplified PICO strategy adapted for Engineering. The obtained results include comparative tables between methanation reactors: Fixed bed; Monolith; Microchannel; Membrane; Sorption-enhanced; Fluidized bed, and catalysis mechanisms: Thermocatalytic; Electrocatalytic; Biocatalytic; Photocatalytic; and Plasmacatalytic, considering their operational parameters. The aim is then to establish a range of CO₂ methanation technological routes characterized by relevant parameters, such as Technological Readiness Level and Cost Effectiveness ratio.

1. INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais provocados pela alta concentração de Gases do Efeito Estufa (GEEs) na atmosfera, bem como pelos altos níveis de emissão diária, sobretudo nos países desenvolvidos, têm motivado o debate entre cientistas, Organizações Não-Governamentais (ONGs) e a Organização das Nações Unidas (ONU), tendo como enfoque o combate às alterações climáticas causadas pelo Aquecimento Global. Nesse contexto emerge o Acordo de Paris que estabeleceu, em 2015, uma abordagem para ação climática, cujas determinações incluem, no artigo 2º, inciso I:

[...]

b) Aumentar a habilidade para adaptação aos impactos adversos das mudanças climáticas, estimular a resiliência climática e o desenvolvimento

com baixas emissões de GEEs, de uma maneira que não ameace a produção de alimentos;

c) Tornar os fluxos monetários consistentes com um caminho direcionado à redução das emissões de GEEs e ao desenvolvimento resiliente do ponto de vista climático;

Dessa forma, a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, do inglês *International Renewable Energy Agency*) estabeleceu a quantidade de 36,9 gigatoneladas de Dióxido de Carbono (CO₂) equivalente (CO₂ eq) anuais que devem ser reduzidas até 2050 para cumprir os objetivos estabelecidos no Acordo de Paris. Essa perspectiva de redução de emissão dar-se-á, sobretudo, a partir da substituição dos combustíveis fósseis como fonte energética das atividades econômicas globais, projeto conhecido como Transição Energética.

Alinhado com esse movimento global, este artigo busca oferecer insights sobre abordagens alternativas para o desenvolvimento de projetos de plantas de metanação. Este foco ganha relevância em um contexto cada vez mais orientado para a adoção de recursos provenientes de energias renováveis, refletindo a visão de uma sociedade comprometida com a construção de uma matriz energética sustentável e resiliente.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Fundamentalmente, o Gás Natural Renovável (GNR) é um combustível sintético que pode ser obtido a partir de duas principais tecnologias: a purificação do biogás derivado da digestão anaeróbica de matéria-orgânica que resulta no bio-metano (CH₄); e a hidrogenação catalítica de óxidos de carbono (CO_x), ou metanação, que obtém como principal produto o Metano Sintético, ou metano elétrico (e-CH₄).

A produção de GNRs, pela vertente da metanação, depende primordialmente da Captura de CO₂, que, em geral, é liberado na combustão de hidrocarbonetos e em processos bioquímicos como a digestão anaeróbia. Devido a isso, não cabe a produção deliberada de CO₂ com a finalidade de produzir Metano Sintético; tornando a captura parte essencial do processo para a caracterização da Metanação do CO₂ como Economia Circular.

No que se refere a isso, o CO₂ capturado pode ser utilizado como reagente em processos de catálise – homogêneos ou heterogêneos –, reações fotocatalíticas, conversões electrocatalíticas e processos bioquímicos. Entre essas possibilidades, o processo de metanação, observado pela primeira vez por Paul Sabatier, em 1902, se baseia na reação entre

CO_x e hidrogênio (H₂) para fins de produção de gás metano (CH₄), tendo como subproduto a água, conforme as reações abaixo. [5]



Apesar ter sido observado no início do século XX, a produção de metano por via catalítica é um processo cujo desenvolvimento tecnológico se deu somente a partir da crise do petróleo, na década de 70, tendo como base a gaseificação do carvão vegetal a fim de substituir o gás natural (KOPYSCINSKI, 2010) e com o principal objetivo de obter GNR a partir da captura de monóxido de carbono (CO). Entretanto, foi somente a partir da década seguinte que o dióxido de carbono (CO₂) passou a ser utilizado como substrato para a metanação. Os principais estudos tiveram ênfase na produção de GNR a partir de gases residuais na produção de aço. Apesar disso, devido aos altos custos operacionais, a tecnologia só se tornou capaz de se mostrar eficiente em escala de bancada.

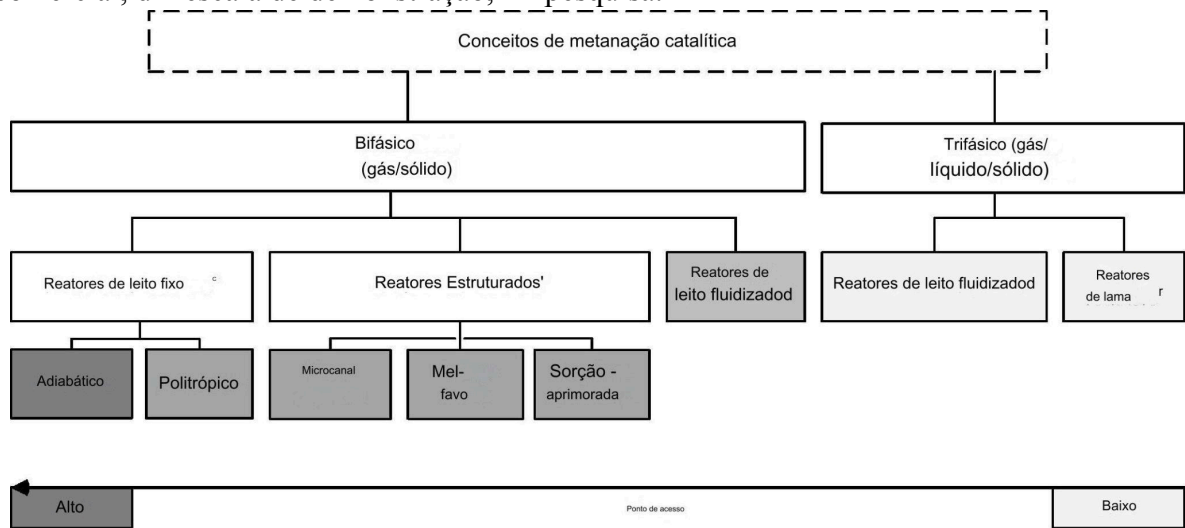
Alguns estudos após Sabatier (1902) exploraram a termodinâmica do processo de metanação. Diversos autores afirmam que a eficiência da conversão do CO₂ é prejudicada na presença de maiores concentrações de monóxido (CO) (MILLS, 1974; RÖNSCH, 2016; WEATHERBEE, 1982). Outros autores, como Rönsch *et al.* (2016) afirmam que no equilíbrio termodinâmico a produção de metano é favorecida pelo aumento de pressão mas limitada, por altas temperaturas.

2.1. Reatores

A metanação é uma reação que libera uma grande quantidade de energia, desta forma, a fabricação de reatores que elaborem um percurso de reação com condições favoráveis e resultados eficientes é um constante desafio visto que a energia produzida deve ser constantemente retirada para que não haja o aumento da temperatura, o qual desfavorece a reação termodinamicamente. Por outro lado, cineticamente, a reação é desacelerada com temperaturas muito baixas, igualmente inconveniente ao processo (GHAIB, 2018).

Nesse contexto, várias tentativas de contornar essas problemáticas foram propostas, tendo início pela primeira vez no Japão nas décadas de 1980-1990 (GÖTZ, 2016), gerando os tipos de reatores e suas variações, como poderá ser averiguado a seguir (Figura 1).

Figura 1: Visão geral dos diferentes conceitos de metanação; Estado de desenvolvimento: c – comercial, d – escala de demonstração, r – pesquisa.

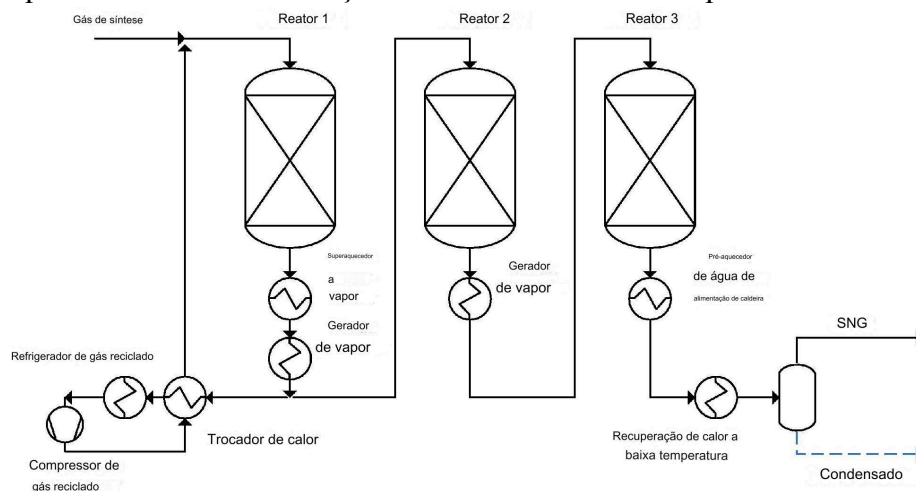


Fonte: RÖNSCH, 2016

2.1.1. Metanação em Leito Fixo

Os reatores de metanação que utilizam leito fixo são os mais usualmente encontrados pela sua simplicidade de processos. Caracterizam-se pelo contato das partículas de catalisador, embalados em leito fixo, com o gás, o qual é passado pelas camadas de leito, que tende a ser bastante uniforme, e são possíveis longos tempos de contato. Podem ser adiabáticos ou politrópicos (GHAIB, 2018).

Figura 2: Exemplo de Reator de Metanação em Leito Fixo chamado processo TREMP.



Fonte: (RÖNSCH, 2016)

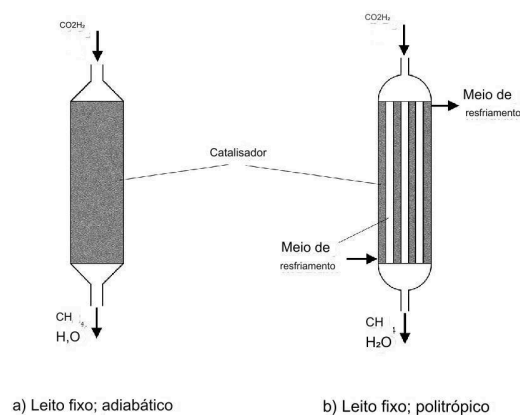
- *Adiabáticos:*

Processo sequencial de reatores adiabáticos relativamente simples e de baixo custo (GHAIB, 2018). Possui as desvantagens de ter pontos quentes de temperatura, altas quedas de pressão (RÖNSCH, 2016) e a pouca flexibilidade de carga (GHAIB, 2018).

- *Polipróticos:*

Processo que une uma infinidade de tubos de diâmetros relativamente pequenos colocados em paralelo. Comparativamente, os reatores politrópicos apresentam gradientes de temperatura mais baixos, portanto maior vida útil e um certo grau de flexibilidade. Contudo, os reatores politrópicos são mais caros e relativamente complexos (GHAIB, 2018).

Figura 3: Reator de Leito Fixo: (a) adiabático e (b) poliprótico



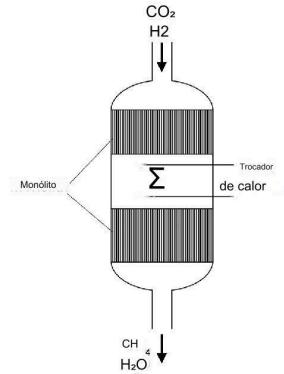
Fonte:(GHAIB, 2018)

2.1.2. *Reatores Monolíticos*

Os reatores do tipo monolíticos são vantajosos no que tange uma maior área superficial específica, a qual permanece em contato com o catalisador, menores quedas de pressão e um menor tempo de reação. No entanto, possuem menor eficiência ao passo que não distribui uniformemente os gases, além de não se adaptarem para atender as necessidades industriais. Estes reatores são geralmente cerâmicos ou metálicos, os quais ou não são apropriados para tensões mecânicas e impacto ou não possuem uma vida útil vantajosa (GHAIB, 2018). Ademais, os reatores estruturados de tipo monolito possuem uma grande dificuldade para substituir o catalisador quando desativado. Esses reatores foram desenvolvidos com avanços em relação aos adiabáticos de leito fixo pois distribuem melhor a

temperatura, devido ao transporte radial, e não possuem altas quedas de pressão (GÖTZ, 2016).

Figura 4: Reator Monolítico

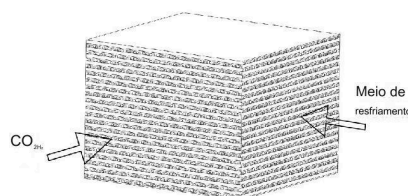


Fonte: (GHAIB, 2018)

2.1.3. *Reatores de Microcanais*

Como avanço das problemáticas dos reatores estruturados, foram desenvolvidos os reatores de microcanais, os quais apresentam uma grande superfície de contato para um pequeno volume de reator (RÖNSCH, 2016) e uma boa hidrodinâmica para preservar o catalisador. No entanto, são reatores de uso único, pois uma vez que o catalisador for desativado, todo o reator precisará ser trocado (GHAIB, 2018).

Figura 5: Reator de Microcanais

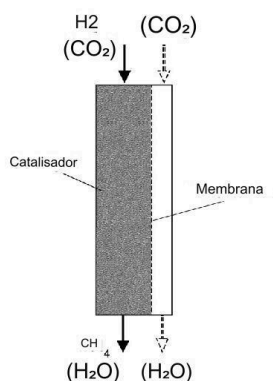


Fonte:(GHAIB, 2018)

2.1.4. *Reatores de Membrana*

Os reatores de membrana são caracterizados pelo uso de uma membrana seletiva, a qual pode ser usada para separar, tirando ou colocando componentes da reação, de modo a deslocar o equilíbrio em direção aos produtos, de acordo com o princípio de Le Chatelier, favorecendo a produção de CH₄. Além disso, é preciso significativamente menos esforço para produzir o gás natural sintético a partir do CH₄ (GHAIB, 2018).

Figura 6: Reator de Membrana

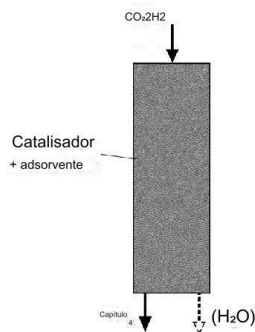


Fonte:(GHAIB, 2018)

2.1.5. Reator Aprimorado por Sorção

O reator aprimorado por sorção pode ser considerado um avanço do próprio reator estruturado de leito fixo (RÖNSCH, 2016), funcionando baseado no mesmo princípio de Le Chatelier (GHAIB, 2018), onde é adsorvido o H_2O da fase gasosa no transportador catalítico (GÖTZ, 2016). O adsorvente, usado juntamente com o catalisador, é frequentemente regenerado no próprio processo através dos princípios de adsorção por pressão ou oscilação térmica, para que possa ser reutilizado. Entretanto, esse tipo de reator é relativamente complexo, além de ciclos de regeneração encurtarem a vida útil (GHAIB, 2018).

Figura 7: Reator Aprimorado por Sorção



Fonte:(GHAIB, 2018)

2.1.6. Reator de Leito Fluidizado

Os reatores de leito fluidizado utilizam um sistema de resfriamento mais eficiente, fazendo com que não seja necessário a utilização de reatores em série com intercoolers de resfriamento, mas sim um único reator com seu próprio processo de remoção de calor (RÖNSCH, 2016). O funcionamento desse reator é caracterizado pela mistura de sólidos fluidizados responsáveis por uma operação próxima à isotérmica. Sua desvantagem está

relacionada ao atrito no catalisador decorrente da grande carga mecânica atrelada a fluidização, como resultado o catalisador é mais facilmente desativado. Somado a esse revés, temos a conversão incompleta de CO₂ decorrente do borbulhamento do leito (GÖTZ, 2016).

2.2. Catálise

2.2.1. Termocatálise

Devido ao alto estado de oxidação do CO₂, sua hidrogenação é uma reação de oxirredução com limitações significativas no que se refere à cinética química, sendo comumente necessário o uso de catalisadores para maior eficiência da reação, os quais devem apresentar alta eficiência e boa atividade em baixas temperaturas, além de se manterem estáveis sob a ação do calor da reação exotérmica (SU, 2016; XU, 2016).

A metanação catalítica por *via* metálica, ou termocatálise, é um método de processamento do CO₂ caracterizado por um alto rendimento espaço-temporal (STY, do inglês *space-time yield*) e altas temperaturas (200-550°C) na presença de metais. No que se refere a isso, diversos autores sugerem que os metais de transição se apresentam como excelentes candidatos a esse tipo de processo devido a sua alta atividade e estabilidade (FRONTERA, 2017; DEBEK, 2019). Dentre eles, o níquel (Ni) se mostra como o mais utilizado devido a seu baixo custo e boa atividade catalítica; o cobalto (Co) apresenta menor atividade catalítica que o Ni e maior custo; o ferro (Fe) é relativamente acessível mas apresenta baixa seletividade de CH₄ (RÖNSCH, 2016); o rutênio (Ru) apresenta alta atividade e estabilidade ao longo de longas faixas operacionais, apesar de apresentar custo mais elevado (BROOKS., 2007; TAN, 2022).

Além disso, a atividade e a estabilidade do catalisador dependem intimamente do seu suporte – isto é, a superfície na qual será anexado –, promotores, método de produção, e pré-tratamento (DEBEK, 2019). Diversos autores exploraram a influência do suporte no mecanismo da metanação catalítica sob as mesmas condições. Para a catálise com níquel, Takenaka *et al.* (2004) estudaram a influência de diferentes suportes de catalisadores (γ -Al₂O₃, SiO₂, TiO₂ e ZrO₂) e relataram que a zircônia (ZrO₂) apresentou o melhor desempenho; apesar disso, o óxido de alumínio (Al₂O₃) é vastamente utilizado devido a sua habilidade de dispersar as espécies metálicas de forma mais eficiente (Li *et al.*, 2015). Outros autores, como Fukuhara *et al.* (2017), afirmam que a catálise metálica com Ni é prejudicado

com suportes de caráter alcalino; e Zhou *et al.* (2016) relataram melhor desempenho de catalisadores baseados em níquel associado à suporte de cério (Ce).

Apesar de se mostrar predominante, o Ni apresenta como desvantagem a ocorrência de sinterização – fenômeno caracterizado pela compactação e depósito de partículas de carbono no suporte catalítico, adquirindo resistência mecânica e interferindo na cinética da reação, sobretudo sob baixas temperaturas de operação (TAN, 2022). Como alternativa, alguns autores sugerem o Rutênio (Ru) como bom candidato à catálise metálica, mesmo apresentando desempenho sensível à escolha do suporte e à dispersão de suas partículas no suporte. Além disso, o Ru apresenta maior reatividade e menor temperatura de operação quando comparado ao Níquel (GARBARINO, 2015, 2016).

Apesar disso, a catálise metálica apresenta algumas desvantagens, como a exigência um alto grau de pureza do substrato devido a sensibilidade do suporte e do catalisador às variações de concentração (FRONTERA, 2017; NEUBERT, 2017; RÖNSCH, 2016); exigindo maior grau de controle e uma etapa de pré-tratamento e análise do reagente.

2.2.2. Biocatálise

Outra alternativa à produção do metano por via catalítica é a biocatálise, ou metanação biológica (BHM, do inglês *biological hydrogen methanation*), tecnologia que tem sido amplamente investigada para fins de enriquecimento do biogás resultante do processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica (GÖTZ, 2016; RUSMANIS, 2019). A digestão anaeróbia (DA) é um método de tratamento da matéria orgânica para fins de produção de gás combustível (biogás), predominantemente constituído de CH₄ (50 - 75%) e CO₂ (25 - 50%), além de outros gases residuais (ANGELIDAKI; 2018). Por estar associada ao uso de microrganismos, os reatores de metanação que operam sob regime de BHM são caracterizados por operarem a baixas temperaturas (37 - 65°C), ao contrário de reatores de catálise metálica (THEMA, 2019).

Tipicamente, o processo de biodigestão ocorre em quatro etapas consecutivas e simultâneas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese; dentre as quais daremos destaque à metanogênese – etapa responsável pelo surgimento de gás metano na mistura gasosa. Essa etapa, em particular, envolve a ação de microrganismos metanogênicos capazes de converter os ácidos graxos voláteis (VFA, do inglês *volatile fatty acids*) oriundos da etapa anterior em CH₄ (GÖTZ, 2016). Em sistemas de BHM, a etapa de metanogênese é auxiliada

por arqueas, sobretudo do gênero *methanothermobacter*, responsáveis por reduzir o CO₂ residual constituinte do biogás em CH₄. De forma similar à catálise metálica, esse processo também ocorre conforme a reação de Sabatier (Equação 1), apesar de apresentar mecanismos distintos.

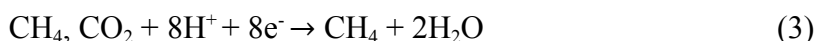
A BHM pode ser realizada tanto de forma simultânea à digestão, em um mesmo reator (*in-situ*), como também em um reator externo adjacente (*ex-situ*). Em reatores *in-situ*, o hidrogênio é introduzido no sistema por meio de difusão gasosa ou pré-mistura, a fim de maximizar a área de contato com as arqueas metanogênicas; já na metanação *ex-situ*, o processo ocorre em um reator externo, com suprimento controlado de nutrientes ao consórcio de microorganismos responsáveis pela catálise. Em ambos os casos, o sistema apresenta como principal vantagem da implementação a captura de CO₂ residual e o enriquecimento do biogás, atribuindo a ele maior valor energético (RUSMANIS, 2019).

Em contraposição, devido ao caráter microbiológico do processo, a BHM tende a apresentar flutuações no rendimento e no grau de impureza do produto gasoso (THEMA, 2019). Além disso, outra dificuldade da implementação desse tipo de tecnologia é a determinação de um método de solubilização do H₂ no substrato orgânico para ação efetiva das arqueas. Devido às dificuldades de dissolução, comumente é necessário o uso de equipamentos de potência – como compressores e sistemas de recirculação – que realizem o processo forçosamente (RUSMANIS, 2019). Alguns autores sugerem a agitação do sistema como método de solubilização, apesar de apresentar a desvantagem de um gasto substancial de energia para manutenção da planta (GERHARD, 1993; NISHIMURA, 1991). Além disso, outra desvantagem comumente associada a esse processo é o menor STY, o que exige reatores mais robustos para a produção de uma quantidade significativa de metano (GÖTZ, 2014; BAILEIRA, 2017).

2.2.3. Eletrocatalise

Outro método ainda utilizado é a eletrocatalise (CO₂RR, do inglês *Carbon Dioxide Reduction Reaction*), que envolve a produção de CH₄ por via eletroquímica. O processo é conduzido com a dissolução de CO₂ em meio aquoso, no qual a água é responsável pelo suprimento de H₂ por via eletrolítica, ocorrendo a eletrólise da água simultânea à redução do CO₂, de forma semelhante à reação de Sabatier (ZHAO, 2021); o processo também utiliza a

típica configuração de Eletrolisadores ou Células a Combustível de Hidrogênio baseadas em Membranas de Troca de Prótons (PEM, do inglês *Proton Exchange Membrane*).



Além de poderem ser reguladas em diferentes tensões a fim de produzir variados produtos, o processo apresenta diversas vantagens frente a outros tipos de metanação catalítica, como a possibilidade de ser conduzido sob condições amenas, não sendo necessário altas pressões e temperaturas; maior disponibilidade de matéria-prima (CO₂ e água); e ser caracterizado como um processo sustentável quando utilizada uma fonte renovável de energia (WU, 2017; ZHAO, 2021)

O processo foi realizado pela primeira por Royer (1870), que aferiu a redução do CO₂ em ácido fórmico (CH₂O₂) a partir de eletrodos de zinco (Zn); em seguida, a partir da década de 1970, outros autores sugeriram a eletrocatalise a partir de outros metais, como In, Cd, Sn, Zn e Pb para formação de CH₂O₂ (JITARU, 1997). Apesar disso, a formação de hidrocarbonetos simples de cadeia curta foi observada pela primeira vez por Hori *et al.* (1985), que obtiveram como principais produtos etileno (C₂H₄) e metano utilizando eletrodos de cobre (Cu) (WU, 2017).

Como principal desafio frente ao desenvolvimento da tecnologia, diversos estudos foram conduzidos a fim de estabelecer um método para aplicação otimizada da eletrocatalise, sobretudo na determinação dos catalisadores – eletrodos – a serem utilizados; dentre os quais se destacam os eletrodos metálicos (WU, 2017; ZHAO, 2021). Hori *et al.* (1980 e 1990) reportaram a produção de CO, CH₄, formiato e outros hidrocarbonetos da CO₂RR utilizando diversos eletrodos metálicos em solução de bicarbonato de potássio (KHCO₃). Dentre os metais explorados, o cobre (Cu) foi o que mostrou melhor desempenho na produção de produção de hidrocarbonetos de cadeia curta – sobretudo CH₄ e C₂H₄.

Dentre os metais investigados, o cobre foi o único que se mostrou capaz de reduzir o CO₂ além de CO e ácido fórmico (HCO₂H). Além disso, alguns autores identificaram a presença de 16 diferentes produtos na CO₂RR na superfície do eletrodo de cobre, dentre eles

aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos, ésteres e outros (KUHL, 2012). A fim de melhorar a seletividade de CH_4 , alguns autores afirmam que a morfologia do Cu utilizado está intimamente relacionada à atividade catalítica do metal e à sua seletividade

Nesse sentido, a eletrocatalise mostra como principais desafios a determinação de novos materiais a serem utilizados como catalisadores a fim de aprimorar a seletividade e produção de CH_4 (WU, 2017). Apesar de apresentar diversas vantagens, o processo necessita de maior grau de maturidade tecnológica, sobretudo no que se refere ao conhecimento dos mecanismos de reação e principais intermediários. Apesar disso, devido a seu desempenho característico no que se refere à atividade catalítica e maior seletividade de CH_4 , os eletrodos de cobre têm se mostrado promissores na maturação da tecnologia de eletrocatalise (ZHAO, 2021).

3.METODOLOGIA

O trabalho de revisão para a formulação das rotas sugeridas neste trabalho, deu-se a partir de uma busca bibliográfica que usou de uma análise baseada na estratégia PICO, que significa respectivamente: População/Problema, Intervenção, Controle e Objetivo (desfecho). Com base na metodologia estabelecida, utilizamos da seguinte forma os conceitos correspondentes às questões da estratégia PICO. Problema: Metanação; Intervenção: reator, catalisador, gás metano; Controle: variáveis de processo (pressão, temperatura, composição dos gases, catalisadores, valores operacionais, etc); Objetivo: viabilidade econômica, maturidade tecnológica e vida útil.

Para fins de obtenção de dados e corpo de pesquisa, foram analisados 25 artigos no total, estes devidamente referenciados na seção correspondente, neste artigo. Seus dados e informações permeiam todo o corpo do embasamento teórico e do desenvolvimento das análises e dos resultados posteriormente explicados.

O passo seguinte à fundamentação bibliográfica, passa então, a ser um comparativo das tecnologias encontradas e uma classificação em ordem da mais praticável à menos, baseada nos quesitos referentes a cada tipo de componente analisado. Para os **reatores**, os quesitos são reciclagem de gás, estresse mecânico, estresse térmico, complexidade da configuração do processo, custos do reator, sua vida útil e seu nível de prontidão tecnológica.

Para os **catalisadores** os quesitos analisados são custo, atividade catalítica, estabilidade, seletividade de CH₄, grau de dispersão das partículas e morfologia.

Sendo assim, para fins de análise, convém construir um método de visualização comparativa entre essas tecnologias, nos possibilitando escolher a mais viável para um período de curto-médio prazo após a publicação deste artigo, período que tem maior probabilidade de dar uma rota viável e assertiva, sem contar com grandes mudanças no cenário tecnológico atual.

4.RESULTADOS

4.1. Relação dos tipos de reatores e suas especificações

Para se correlacionar os aspectos mais relevantes das bases de dados, foi elaborada a Tabela 1, a qual é visualmente objetiva para se analisar os dados encontrados. No entanto, as decisões sobre melhores rotas tecnológicas precisam de uma ordem de prioridade para um cenário específico.

Tabela 1: Comparativo das Tecnologias de Reatores

Conceito	L. Fixo adiabático	L. Fixo politrópico	Micro canais	Membrana	Sorção aprimorada	Leito fluidizado
Reciclagem de gás	Geralmente	Às vezes	Não	Não	Não	Às vezes
Estresse mecânico do cat.	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto
Estresse térmico do cat.	Alto	Moderado	Moderado	Baixo	Alto	Baixo
Complexidade do processo	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Alta	Baixo
Custos do reator	Médio	Alto	Muito alto	Alto	Média	Baixo
Vida útil	Médio	Alto	Muito curta	Curta	Curta	Curta
Nível de prontidão tecnológica	9	7	4-5	2-3	7	7

Fonte: Adaptada à partir da pesquisa de Rönsch (2016) e combinada a Ghaib (2018)

O contexto deste estudo é delineado por uma urgência de implementação, com espaço para desenvolvimento de protótipos de pesquisa simultânea, desde que viáveis para aplicação em menor escala a médio prazo; restrições significativas nos custos operacionais (OPEX) e elevados custos de aquisição (CAPEX); uma rigorosa exigência ambiental que demanda a máxima utilização do CO₂ disponível; e por último, a flexibilidade dos processos para se adaptarem às necessidades. Cada uma dessas características assume sua posição correspondente em termos de prioridade e importância.

4.2. Relação dos tipos de catalisadores

Segundo Götz (2016), a Metanação Biológica não é adequada para média e grandes escalas, limitando-se ao pequeno porte. Além do mais, possui custos ligeiramente mais elevados e menor eficiência, comparativamente. Atualmente esse processo existe apenas em estado de projeto piloto ou em pequena escala. No entanto, um grande atrativo que esse método traz é o de ser mais tolerante às impurezas.

A Termocatálise é a mais consolidada pois está presente nos reatores de leito fixo, leito fluidizado, de membrana e os demais já citados, já sendo comercializados e tendo plantas em funcionamento (DE OLIVEIRA, 2020).

Segundo Zhao (2021), a Eletrocatalise ainda precisa de muita pesquisa e desenvolvimento para atingir melhores patamares de maturidade tecnológica. Os resultados são promissores mas se mostram inviáveis industrialmente com o pouco que já foi descoberto, necessitando mais descobertas e aprimoramento de processos.

4.3. Rotas tecnológicas

De modo a apontar com assertividade as melhores rotas para o desenrolar de um projeto de metanação não apenas eficiente, mas também apontado na direção de projetos sustentáveis que são, agora, de grande necessidade, e que futuramente serão mandatórios, tendo sempre como base o contexto do projeto, pode-se apontar as prioridades no que tange aos critérios de escolha. Elas são, respectivamente: Maturidade Tecnológica; Custos Totais; Sustentabilidade; Simplicidade dos Processos.

É notório que, pela Tabela 1, ambos **Reatores de Leito Fixo** se destacam pela sua composição de vantagens que possuem de média a alta prontidão tecnológica, preservação mecânica do catalisador, sendo uma tecnologia desenvolvida a ponto de mercado, além de

uma carga de custos correspondentes ao orçamento, mas que se pagam em tempo de vida útil do equipamento, sendo assim os destaques da análise dos reatores. Uma opção para estudos a serem desenvolvidos em paralelo, é o uso de reatores a leito fluidizado e biorreatores, que poderão ser uma boa opção de investimento para desenvolver tecnologias com uma certa maturidade e boas possibilidades de retorno energético, mas que não são tão seguras em um primeiro momento. Quanto ao catalisador, o mais adequado para o uso, dado a necessidade de cumprir a meta econômica, deverá ser o Ni, com suporte de óxido de alumínio (Al_2O_3).

5. CONCLUSÃO

Em conclusão, este estudo objetivou à exploração sistemática, por meio de revisão bibliográfica, ao processo de produção de Gás Natural Renovável, tendo enfoque na reação de Metanação, marcada, sobretudo, pela conversão do CO_2 em CH_4 por meio da utilização do Hidrogênio no contexto de evolução tecnológica e estabelecimento das suas tecnologias.

Nesse sentido, este trabalho abordou as possíveis rotas de desenvolvimento tecnológico direcionadas pela perspectiva de Distribuição Universal, Potencialização da Produção e Emprego Industrial do Gás Natural Renovável, cuja execução de projetos pode possibilitar o desenvolvimento socioeconômico de regiões além da abrangência da rede de tubulações de gás no Brasil. Dessa maneira, foram encontradas alternativas capazes de aliar o já reconhecido potencial brasileiro, sobretudo na região do Ceará, na geração de energias renováveis e da incipiente recuperação energética de efluentes, que podem atuar como fonte de recursos hídricos para a produção de hidrogênio.

Portanto, as rotas tecnológicas com o maior potencial para efetivar a conversão do CO_2 , que também confere um aspecto de redução de emissões baseado em economia circular, em CH_4 utilizando Hidrogênio são relacionadas, primordialmente, ao mecanismo de catálise empregado na quebra da estabilidade da molécula de dióxido de carbono.

A análise conclusiva dos resultados sugere que a configuração mais promissora consiste em um reator de Leito Fixo, destacando-se pelo elevado grau de maturidade tecnológica (TRL) e pela relação custo/efetividade favorável. Associado a isso, o uso de um catalisador à base de níquel demonstrou apresentar elevada atividade e seletividade. Essa combinação tende a proporcionar um desempenho de alta eficiência, emergindo como uma das alternativas mais vantajosas no contexto de implantação de uma unidade de metanação a nível de mercado.

Por fim, a revisão abrangeu diversos estudos que enfatizaram, inicialmente, a necessidade de ampliar a pesquisa em áreas que alcançaram um estágio avançado de maturidade tecnológica, porém ainda não são economicamente viáveis em escala de mercado, dessa forma duas áreas mostram-se promissoras, Biocatálise e Metanação no Reator de Leito Fluidizado, e deverão ser estudadas de forma concomitante, desde que hajam recursos para tal. Isso amplia as possibilidades e as rotas tecnológicas disponíveis. Além disso, destacaram a relevância da metanação no contexto da Transição Energética Global, especialmente quando integrada às Energias Renováveis e impulsionada pelo Hidrogênio Verde, o que minimiza significativamente a pegada de carbono. Este processo direciona ações para uma economia mais sustentável e resiliente, contribuindo para alcançar as metas de redução de emissões estabelecidas nos acordos internacionais.

REFERÊNCIAS

- ANGELIDAKI, Irini et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology advances*, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018.
- BAILERA, Manuel et al. Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 69, p. 292-312, 2017.
- BROOKS, Kriston P. et al. Methanation of carbon dioxide by hydrogen reduction using the Sabatier process in microchannel reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 62, n. 4, p. 1161-1170, 2007.
- DĘBEK, Radosław et al. A review on plasma-catalytic methanation of carbon dioxide—Looking for an efficient catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 116, p. 109427, 2020.
- DE OLIVEIRA, Ricardo Almeida Barbosa. Estudo da viabilidade técnica e económica na produção de gás natural sintético por metanação catalítica. 2020.019.
- FRONTERA, Patrizia et al. Supported catalysts for CO₂ methanation: a review. *Catalysts*, v. 7, n. 2, p. 59, 2017.
- FUKUHARA, Choji et al. A novel nickel-based structured catalyst for CO₂ methanation: A honeycomb-type Ni/CeO₂ catalyst to transform greenhouse gas into useful resources. *Applied Catalysis A: General*, v. 532, p. 12-18, 2017.
- GARBARINO, Gabriella et al. Methanation of carbon dioxide on Ru/Al₂O₃: catalytic activity and infrared study. *Catalysis Today*, v. 277, p. 21-28, 2016.
- GARBARINO, Gabriella et al. Methanation of carbon dioxide on Ru/Al₂O₃ and Ni/Al₂O₃ catalysts at atmospheric pressure: catalysts activation, behavior and stability. *International journal of hydrogen energy*, v. 40, n. 30, p. 9171-9182, 2015.
- GHAIB, Karim; BEN-FARES, Fatima-Zahrae. Power-to-Methane: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 433-446, 2018.
- GÖTZ, Manuel et al. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable energy*, v. 85, p. 1371-1390, 2016.

HORI, Yoshio; KIKUCHI, Katsuhei; SUZUKI, Shin. Production of CO and CH₄ in electrochemical reduction of CO₂ at metal electrodes in aqueous hydrogencarbonate solution. *Chemistry letters*, v. 14, n. 11, p. 1695-1698, 1985.

IRENA (2023), IRENA's energy transition support to strengthen climate action: Insight to impact 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

JITARU, M. et al. Electrochemical reduction of carbon dioxide on flat metallic cathodes. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 27, p. 875-889, 1997.

KOPYSCINSKI, Jan; SCHILDHAUER, Tilman J.; BIOLLAZ, Serge MA. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass—A technology review from 1950 to 2009. *Fuel*, v. 89, n. 8, p. 1763-1783, 2010.

LI, Yakun et al. Ni-A Ni₂O₃/Ni-foam catalyst with enhanced heat transfer for hydrogenation of CO₂ to methane. *AIChE Journal*, v. 61, n. 12, p. 4323-4331, 2015.

MILLS, G. Alex; STEFFGEN, Fred W. Catalytic methanation. *Catalysis Reviews*, v. 8, n. 1, p. 159-210, 1974.

NEUBERT, M. et al. Influence of hydrocarbons and thiophene on catalytic fixed bed methanation. *Fuel*, v. 207, p. 253-261, 2017.

NISHIMURA, Norihiro et al. Growth of thermophilic methanogen KN-15 on H₂-CO₂ under batch and continuous conditions. *Journal of fermentation and bioengineering*, v. 72, n. 4, p. 280-284, 1991.

RÖNSCH, Stefan et al. Review on methanation—From fundamentals to current projects. *Fuel*, v. 166, p. 276-296, 2016.

RUSMANIS, Davis et al. Biological hydrogen methanation systems—an overview of design and efficiency. *Bioengineered*, v. 10, n. 1, p. 604-634, 2019.

SU, Xiong et al. Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methane: A review of recent studies. *Journal of energy chemistry*, v. 25, n. 4, p. 553-565, 2016.

TAN, Chung Hong et al. Current Developments in Catalytic Methanation of Carbon Dioxide—A Review. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, p. 795423, 2022.

THEMA, Martin et al. Biological CO₂-methanation: an approach to standardization. *Energies*, v. 12, n. 9, p. 1670, 2019.

WEATHERBEE, Gordon D.; BARTHOLOMEW, Calvin H. Hydrogenation of CO₂ on group VIII metals: II. Kinetics and mechanism of CO₂ hydrogenation on nickel. *Journal of Catalysis*, v. 77, n. 2, p. 460-472, 1982.

XU, Jinghua et al. CO₂ methanation over TiO₂-Al₂O₃ binary oxides supported Ru catalysts. *Chinese journal of chemical engineering*, v. 24, n. 1, p. 140-145, 2016.

ZHAO, Runbo et al. Recent progress in electrocatalytic methanation of CO₂ at ambient conditions. *Advanced Functional Materials*, v. 31, n. 13, p. 2009449, 2021.

APLICAÇÃO DA RASTREABILIDADE DO HIDROGÊNIO VERDE NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Tatyne Mityko Dias Fussuma ¹

Eric Scromovas Salge ²

André Luiz Veiga Gimenes ³

Miguel Edgar Morales Udaeta ⁴

Resumo

O hidrogênio (H₂) é visto mundialmente como o elemento fundamental para a transição energética, isso porque possui uma alta densidade energética, pode ser utilizado como vetor de armazenamento de energia, possui versatilidade de uso e, sua fonte de energia, dependendo do seu processo de produção, pode ser de baixo ou nulo carbono. Desta forma, a diferenciação de acordo com o teor de carbono envolvido na sua produção, trata-se de um fator chave para sua precificação. Nesse sentido, um dos maiores desafios atuais na economia do Hidrogênio Verde (H₂V), consiste na confiabilidade e rastreabilidade de sua origem. H₂ de diferentes origens possuem valores distintos no mercado, existindo assim motivação para fraudar a origem do ativo. Portanto, este artigo visa descrever as rotas tecnológicas para produção do Hidrogênio, além de elencar as tecnologias mais utilizadas para sua rastreabilidade no setor elétrico, e por fim, determinar como poderá ser realizada a rastreabilidade do Hidrogênio Verde no Brasil utilizando a tecnologia Blockchain, em concordância com o Manual de Certificação do Hidrogênio realizado pela CCEE. Desse modo, além da comparação direta do montante de H₂V produzido inicialmente nas plantas, com o volume de energia contratada ou gerada pelo agente, a solução proposta visaria também combinar a tecnologia Blockchain com o modelo de Book and Claim utilizado hoje no processo de certificação da CCEE. Após os dados serem obtidos pelo cruzamento do volume de H₂ gerado com os dados coletados da CCEE, essas informações seriam transmitidas pela rede através de criptografia AES e seriam por fim armazenadas em Blockchain para garantir sua transparência e imutabilidade a fim de se evitar alterações

1 Estudante de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: tatyanemityko@usp.br

2 Graduado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: ericssalge@usp.br

3 Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: gimenes@gmail.com

4 Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: udaeta@pea.usp.br

indevidas. Desse modo, a tecnologia Blockchain poderia ser utilizada para registrar RECs como tokens e controlar as operações sobre esses ativos. Além disso, essa descentralização do Blockchain reduziria a atuação de autoridades centrais, promovendo a desintermediação de processos e, conseqüentemente, reduziria o custo das operações, ao reduzir o espaço para manipulações, erros e omissões das grandes empresas geradoras e distribuidoras.

Palavras-chave: Certificação do hidrogênio, Blockchain, Tokenização, CCEE.

1) INTRODUÇÃO

O hidrogênio verde (H₂V), produzido através de energia renovável, desempenhará um papel estratégico para diversos países. Considerando que o H₂ tem a possibilidade de funcionar como vetor de armazenamento de energia, este torna-se um recurso com capacidade de promover o acoplamento dos mercados de combustíveis (transportes pesados, aviação, aquaviário e rodoviário), das indústrias (siderurgia e fertilizantes), além do sistema elétrico e outros. Desse modo, a partir da substituição do uso de combustíveis fósseis em diferentes atividades econômicas, o H₂V pode potencializar a descarbonização de setores altamente poluidores, reduzir a exposição à volatilidade de preços e a necessidade de importação de recursos fósseis.

Ademais, outro aspecto importante a ser mencionado, é que a transformação do hidrogênio como principal vetor energético, tem levado à busca por diferenciação da sua origem de produção, bem como ao eventual acoplamento ou não de tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono (CCS, CCU ou CCUS).

Cabe ressaltar também que a simplicidade da molécula de hidrogênio (apenas dois átomos de hidrogênio) a caracteriza como um produto quimicamente homogêneo, sem variações de qualidade. Distinções estas que podem ser observadas quanto à forma de fornecimento (puro/em mistura, gasoso/líquido, adsorvido/combinado etc.) (EPE, 2021), porém tais possibilidades não alteram este caráter quimicamente homogêneo mencionado.

Desta forma, a diferenciação de acordo com o teor de carbono envolvido na produção de hidrogênio busca acoplar o diferencial por qualidade ambiental, possibilitando a existência de preço “prêmio” a depender da origem da produção sem, contudo, alterar a natureza intrínseca de homogeneidade química da molécula de H₂ (EPE, 2021), na qual é indistinta da fonte que a produziu.

Portanto, este artigo tem como objetivo determinar como poderá ser realizada a rastreabilidade do Hidrogênio Verde no Brasil utilizando a tecnologia Blockchain, em concordância com o Manual de Certificação do Hidrogênio realizado pela CCEE. Para tanto, também irá descrever as rotas tecnológicas para produção de Hidrogênio, além de elencar as tecnologias mais utilizadas para sua rastreabilidade no setor elétrico.

2) REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo consta das principais fundamentações teóricas para compreensão do objetivo final desse artigo. Assim, será relatado primeiro os conceitos que envolvem as rotas tecnológicas de produção do hidrogênio, sua classificação por cores e seus custos. Posteriormente, será abordado sobre os certificados internacionais de energia renovável, o manual para certificação do hidrogênio produzido pela CCEE e, por fim, a aplicação da tecnologia Blockchain no sistema elétrico e na certificação do hidrogênio.

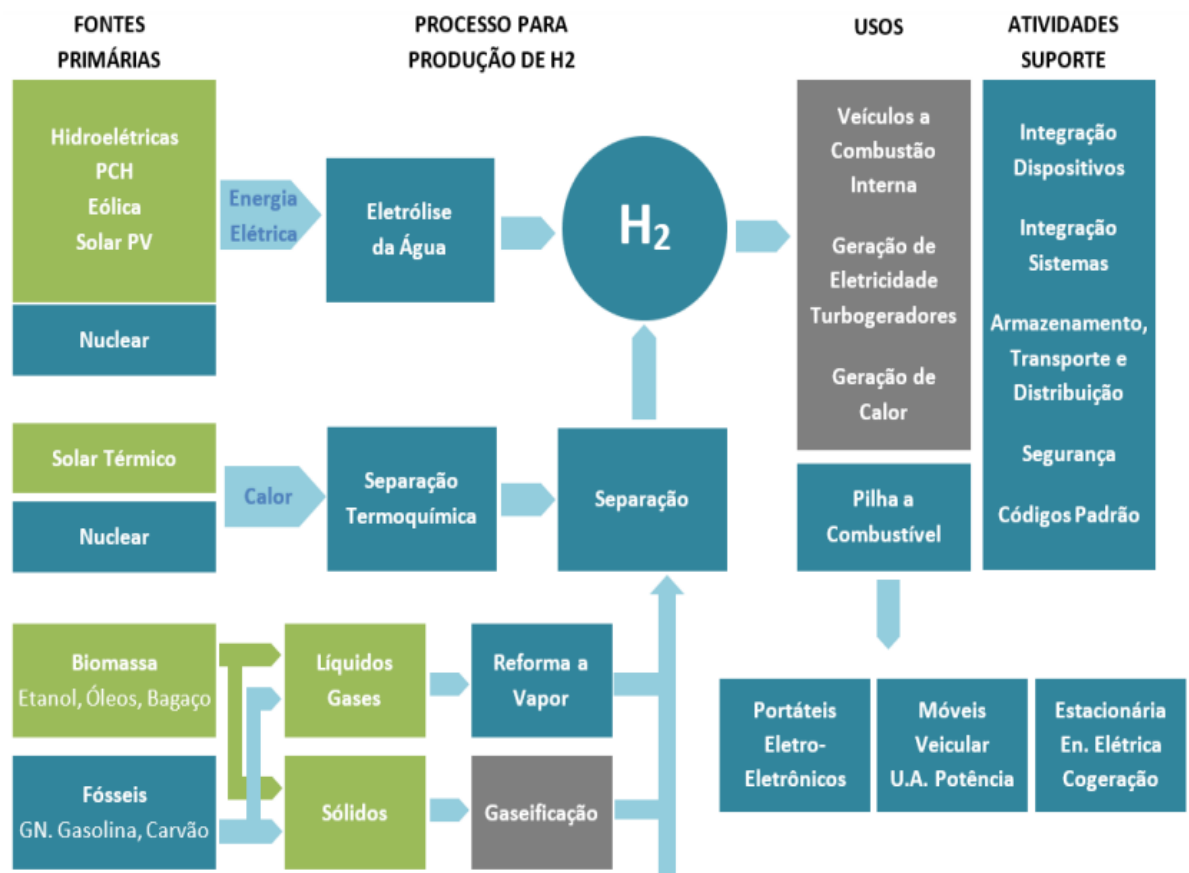
2.1) Rotas Tecnológicas e Processos de Geração do Hidrogênio

A obtenção de hidrogênio pode se dar a partir de diversas matérias-primas, de ocorrências naturais (H_2 geológico) a processos físico-químicos ou bioquímicos (MME, 2021). A Figura 1 apresenta esses processos, de forma simplificada, desde sua produção até aplicações.

Entre as matérias-primas renováveis fornecedoras de átomos de hidrogênio, podem ser utilizadas a água, a biomassa e os biocombustíveis líquidos e gasosos, tais como o etanol e o biogás/biometano, por exemplo. A conversão da água em hidrogênio é feita, principalmente a partir da eletrólise. Para isso, a eletricidade utilizada no processo pode ser de origem renovável (por exemplo, eólica, solar ou hidráulica), obtendo hidrogênio com baixo ou nulo teor de carbono (EPE, 2021). Das quais duas tecnologias de eletrólise se destacam: a Alcalina Clássica e a de Membrana Polimérica Eletrolítica (PEM).

Porém, de acordo com o relatório “*Global Hydrogen Review 2023*” da Agência Internacional de Energia (IEA), 95 milhões de toneladas (Mt) de hidrogênio de todos os tipos foram gerados em 2022, desse total, cerca de 94 Mt foram oriundos de fontes não renováveis, como a reforma térmica do metano, processo com elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE). E menos de 1 Mt foi de hidrogênio de baixo carbono, em sua maioria obtido da reforma do metano com sequestro e captura de carbono.

Figura 1 - Representação esquemática de rotas tecnológicas para obtenção do hidrogênio



Fonte: (EPE, 2021).

2.2) Classificação do Hidrogênio

Pelo fato de a utilização do hidrogênio estar sendo impulsionada pelas metas de descarbonização, ele é constantemente referido na literatura por cores (GESEL, 2023), de acordo com o grau de neutralidade da tecnologia de produção em questão (porém não existe um padrão internacional de cores, ocasionando em algumas variações na literatura). A Figura 2 apresenta as classificações das rotas de produção de hidrogênio mais atuais.

Como observado na figura, o Hidrogênio Verde é produzido via eletrólise da água a partir de fontes renováveis, sendo assim uma produção livre de emissões de CO_2 e, em decorrência disso, mais cara em relação as cores mais desenvolvidas no mercado (cinza, azul e turquesa).

Alternativamente, existe também a produção de hidrogênio utilizando como matéria prima a biomassa, cujo termo técnico correto seria hidrogênio musgo, como descrito na Figura 2. Porém por se tratar de uma energia renovável e de grande potencial, observa-se o crescimento do termo hidrogênio renovável no lugar de hidrogênio musgo, principalmente por ser um termo mais compreensível e midiático. Fato semelhante ocorre com o termo hidrogênio de baixo

carbono, sugerido pela IEA por entender que a classificação de cores é imprecisa e desprovida de aplicação prática em processos decisórios de contratação de projetos na área, podendo gerar dificuldades regulatórias.

Figura 2 - Classificação do hidrogênio a partir da tecnologia de produção

Cor	Classificação	Descrição
■	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem CCUS
■	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
■	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
■	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis), com CCUS
■	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar).
□	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
■	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂
■	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
■	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

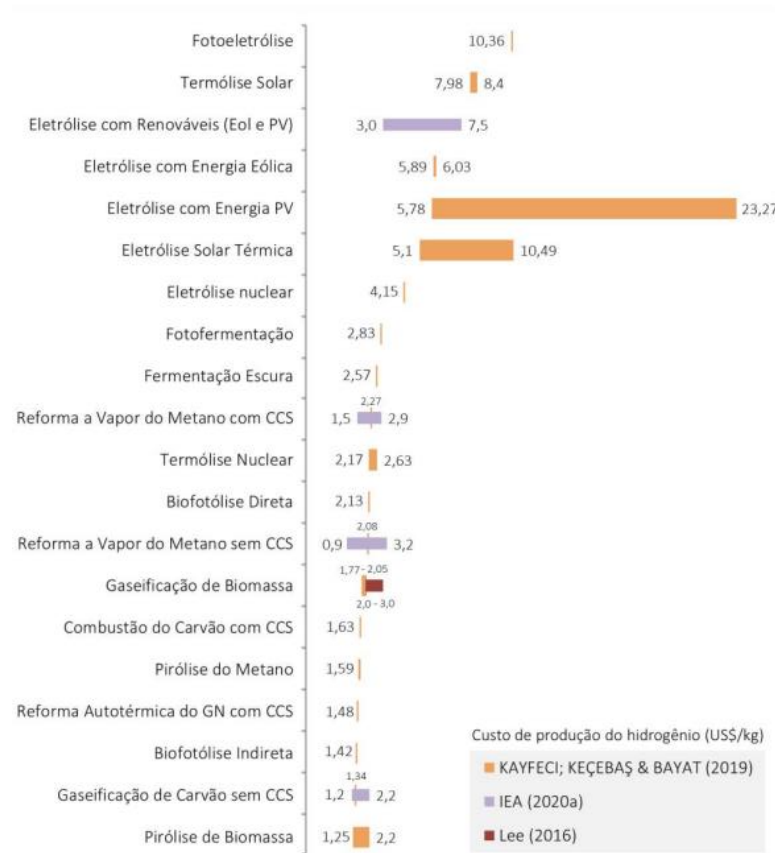
Fonte: (Adaptado de EPE, 2021).

2.3) Custos e Aspectos Competitivos do Hidrogênio

Os menores custos de produção do hidrogênio atualmente, de acordo com a IEA, são observados na reforma a vapor do metano (gás natural) e na gaseificação do carvão (IEA, 2020), que consistem em rotas tecnológicas baseadas em fontes energéticas fósseis. Já a eletrólise da água usando fontes renováveis é, em geral, a rota tecnológica mais cara (KAYFECI, KEÇEBAS, BAYAT, 2019) dentre as já disponíveis no mercado, como observado na Figura 3.

Porém, um estudo da IRENA (2019) aponta que, nos melhores casos, o hidrogênio verde produzido a partir de fontes eólica e solar possa se tornar competitivo antes de 2025 em relação ao hidrogênio de origem fóssil (IRENA, 2019). Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040, com a aceleração de redução de custos de investimento da eletrólise e de geração elétrica com renováveis variáveis.

Figura 3 - Faixas de custos da produção de hidrogênio



Fonte: (EPE, 2021).

2.4) Certificados Internacionais de Energia Renovável

Assim, em concordância com o apoio em desenvolver o mercado de energias renováveis, surge o certificado REC (*Renewable Energy Certificate*), no qual equivale a 1 MWh de energia renovável gerada (VENTURUS, 2020) e é um instrumento de mercado utilizado para representar o direito de propriedade sobre os atributos ambientais relacionados à geração de energia renovável.

Isso é, são certificados que atestam que a energia foi gerada a partir de fontes renováveis (como a hídrica, solar, eólica, biomassa ou geotérmica) e podem ser comercializadas, além de possuírem algumas informações como: data em que o certificado foi emitido, a localização da infraestrutura de geração, o perfil do gerador e até requisitos de sustentabilidade e redução de CO₂ (VENTURUS, 2020).

Para tanto, existem vários sistemas de registros de certificados ao redor do mundo, como o RPS (*Renewable Portfolio Standard*) dos Estados Unidos, ou o GO (*Guarantee of Origin*)

comercializado na Europa. Enquanto no Brasil, o sistema de emissão e transferência de RECs é garantido por medições de fato, embasadas pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (Canal Energia, 2018), e pelo sistema de rastreamento que segue o padrão IREC, um padrão da *International REC Standard* adotado também por outros países.

2.5) Certificação do Hidrogênio da CCEE

Nesse sentido, com o objetivo de apoiar o mercado de hidrogênio global, surge a certificação de hidrogênio da CCEE, na qual consiste em um processo que busca atender os requisitos nacionais e internacionais de certificação (CCEE, 2023). Caracterizada por ser uma ferramenta de caráter comprobatório, em que os consumidores possam comprovar a origem e rastrear os atributos ambientais do produto.

Esta certificação, também visa a facilitar a habilitação do produtor de hidrogênio para o mercado, fortalecendo a segurança e credibilidade do seu produto. E com base nisso foi criado o Manual para Certificação do Hidrogênio, produzido pela CCEE, na qual busca:

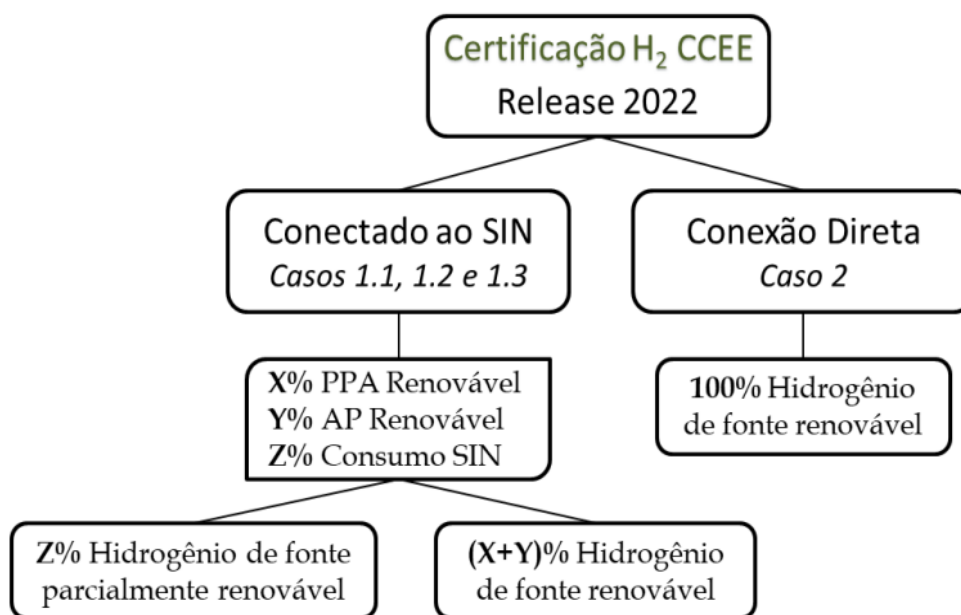
- Evidenciar os atributos de sustentabilidade do hidrogênio (especificamente a pegada de carbono) com credibilidade e consistência global;
- Agregar valor ao produto pois possibilita a distinção do teor de carbono do hidrogênio comercializado;
- Oferecer transparência para os clientes e permitir que o consumidor tenha o poder de escolha;
- Possibilitar novos modelos de negócio em outros setores da indústria, como fertilizantes, aço, cimentícia, alimentícia, transporte, aquecimento, entre outros;
- Permitir que os consumidores sinalizem a demanda por hidrogênio em suas credenciais de sustentabilidade;
- Gerar credibilidade entre potenciais importadores e exportadores, promovendo o comércio global e transfronteiriço de hidrogênio com base em suas credenciais de sustentabilidade;
- Fomentar o mercado nacional de hidrogênio cumprindo os requisitos e as diretrizes regulatórias do Brasil em discussão.

Tendo em vista que o escopo inicial da certificação é estritamente técnico, o manual garante que será realizado a validação apenas da produção de hidrogênio por meio de eletrólise, sem a

realização de qualquer avaliação de Integridade, de Conflitos de Interesses ou Socioambiental da cadeia produtiva das empresas certificadas.

Além disso, o produtor de hidrogênio poderá ter sua produção certificada em duas classificações distintas: hidrogênio de fonte renovável e hidrogênio de fonte parcialmente renovável. O tipo de classificação dependerá da parcela de energia com comprovação renovável. A Figura 4 representa as duas modalidades que poderão ser certificadas e as possíveis classificações concedidas.

Figura 4 - Modalidades e classificações da certificação de hidrogênio.



Fonte: (CCEE, 2023).

Ademais, importante salientar que a CCEE (2023) utiliza o sistema Book and Claim, no qual permite uma maior abrangência nos modelos de negócio do produtor, já que através dele é possível que o certificado seja negociado, ou seja, transferido os atributos ambientais da produção de hidrogênio para outro produtor, desde que ambos estejam registrados no sistema da CCEE e a operação seja também registrada.

Assim, com relação a rastreabilidade da certificação do hidrogênio, esta precisa ser controlada e por isso qualquer processo de transferência, cancelamento ou expiração dos certificados emitidos precisam ser registrados. Além disso, este mecanismo é essencial para o sistema Book and Claim do certificado e evita dupla contagem.

Porém, as plataformas atuais de registro de certificados são normalmente comercializados em mercados locais, próprios de cada país, com entidades intermediárias e processos

burocráticos, que aumentam os custos das transações e inviabilizam uma maior participação de empresas e indivíduos interessados em participar desse mercado.

Desse modo, a tokenização desses ativos em sistemas de Blockchain é vista como uma possível alternativa para a criação de um mercado que possa viabilizar a comercialização desses créditos em escala global (VENTURUS, 2020). Visto que, as plataformas de registro como RECs são sistemas centralizados, ao passo que Blockchain é um sistema distribuído.

2.6) Tecnologia Blockchain

Juntamente com ferramentas como Big Data e Inteligência Artificial, a aplicação do Blockchain no setor elétrico traz inúmeras possibilidades para descentralizar o comércio de energia e potencializar o desenvolvimento de novas soluções. Uma vez que tem se mostrado uma ferramenta com grande eficiência operacional, capaz de gerenciar dados em tempo real, reduzir custos, tornar o sistema mais sustentável e garantir mais acessibilidade e transparência às informações (SANTOS, 2022).

Nesse contexto, uma das soluções vinculadas ao modelo Blockchain é a certificação de energia renovável, sendo possível acelerar e automatizar os processos de rastreabilidade da energia gerada, consumida e as emissões evitadas no processo. Essa é uma grande vantagem para contratos de compra e venda de energia a longo prazo, com base em geração renovável, que exigem a comprovação da origem de geração e a quantidade produzida. É segurança, transparência e acessibilidade digital durante as transações (ENGIE, 2020).

De forma mais técnica, um Blockchain é um registro distribuído que utiliza criptografia para garantir a segurança e a integridade dos dados. Ele opera como um livro-razão descentralizado e sua arquitetura complexa contribui para a eficiência em termos de segurança, motivo pelo qual redes de criptomoedas e outros ativos digitais utilizam o Blockchain como sua espinha dorsal. Abaixo é possível encontrar um resumo dos principais componentes da arquitetura do Blockchain (IBM, 2023):

- **Blocos:** A Blockchain é composta por uma cadeia de blocos (*blocks*), onde cada bloco contém um conjunto de transações. Cada bloco está ligado ao anterior por meio de um *hash*, criando assim uma cadeia imutável.
- **Transações:** São as operações que ocorrem na rede e são agrupadas em blocos. As transações podem incluir a transferência de ativos, contratos inteligentes ou qualquer outra ação que seja suportada pela Blockchain específica.

- Hash: Um *hash* é uma função criptográfica que converte dados em uma sequência alfanumérica fixa. Cada bloco contém o *hash* do bloco anterior, criando uma ligação permanente entre os blocos. Isso torna a Blockchain resistente a alterações, pois qualquer modificação em um bloco afetaria todos os blocos subsequentes.

- Consenso: Para garantir a validade das transações e manter a integridade da rede, é necessário um mecanismo de consenso. O consenso é o processo pelo qual os participantes da rede concordam sobre o estado atual da Blockchain. Métodos comuns incluem Prova de Trabalho (*Proof of Work*), Prova de Participação (*Proof of Stake*) e *Delegated Proof of Stake*.

- Nós: Os nós são os participantes da rede que mantêm cópias da Blockchain e validam as transações. Existem nós completos que mantêm uma cópia completa da Blockchain e validam todas as transações, e existem nós leves que confiam nos nós completos para validar as transações.

- Contratos Inteligentes: São programas autoexecutáveis que rodam na Blockchain e são usados para automatizar acordos e contratos. Eles são escritos em linguagens de programação específicas da Blockchain e executados automaticamente quando as condições predefinidas são atendidas.

- Consistência e Imutabilidade: A consistência é mantida pela cópia distribuída da Blockchain em todos os nós. A imutabilidade é garantida pelo uso de *hashs* e criptografia, o que torna extremamente difícil alterar um bloco após ser adicionado à cadeia. Além disso, o Blockchain não aceita intermediários, o que garante a confidencialidade das operações.

2.7) Certificação do Hidrogênio através de Blockchain

Foram utilizadas três principais referências como bases primordiais para a aplicação do proposto neste trabalho. Sendo a primeira uma dissertação, defendida por Laura Sánchez (2021) em Madrid, com o tema "*Certifying green hydrogen's origin through Blockchain*". No qual foca na certificação da origem do hidrogênio verde e se baseia no *Hyperledger Fabric* para gerar certificados de garantia de origem do hidrogênio verde dentro da própria empresa Blockchain, o que aumenta a segurança do processo.

A segunda referência trata-se da empresa Acciona, considerada a pioneira, ao desenvolver em 2021 uma plataforma funcional baseada em Blockchain para acompanhar a origem do hidrogênio verde. Permitindo visualizar toda a cadeia de valor do H₂V com o GreenH₂chain®, no qual permite aos consumidores de hidrogênio renovável quantificar, registrar e monitorizar a

descarbonização do seu consumo de energia. Além de fornecer toda a informação correspondente ao consumo efetuado, bem como todos os dados necessários para quantificar as emissões de dióxido de carbono (CO₂) evitadas pela utilização deste tipo de energia limpa, tudo isso podendo ser realizado de qualquer parte do mundo, e com verificação em tempo real. (ACCIONA, 2023).

E a terceira referência trata-se da parceria firmada pela SAP com o programa do Ministério de Assuntos Econômicos e Ação Climática da Alemanha, implementado no Brasil pela Agência de Desenvolvimento Alemã (GIZ). Assim, a SAP será facilitadora da certificação de sustentabilidade do hidrogênio verde brasileiro por meio da solução GreenToken, que utiliza uma abordagem Blockchain para coletar as informações de qualquer matéria-prima com transparência, auxiliando assim, empresas brasileiras a exportarem hidrogênio verde para a Alemanha por meio do H₂Uppp (Canal Energia, 2023).

3) METODOLOGIA

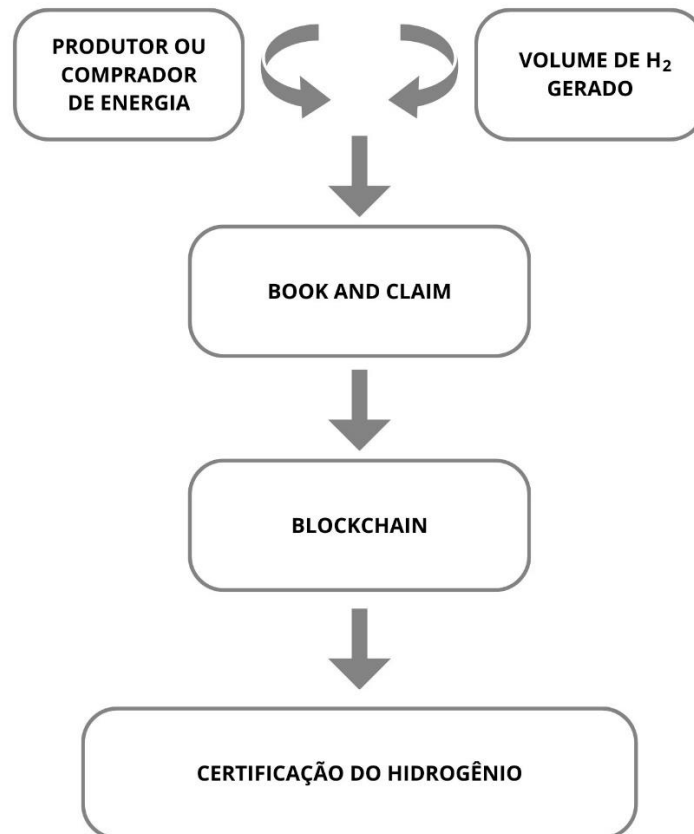
3.1) Proposta de Combinação de Book and Claim com Blockchain

Após a análise das diferentes técnicas e tecnologias de rastreabilidade presentes no mercado de energia, foi elaborada uma proposta de mecanismo de classificação e monitoramento da origem do hidrogênio verde que combinasse o uso da tecnologia Blockchain, com o padrão de Certificação do Hidrogênio realizado pela CCEE, ilustrado na Figura 5.

Desse modo, com o cruzamento dos dados referentes a compra ou produção de energia e o volume de H₂ gerado, o processo seguiria para o sistema de Book and Claim. Após essa etapa, essas informações seriam transmitidas pela rede através de criptografia AES e seriam por fim armazenadas em Blockchain para garantir sua transparência e imutabilidade a fim de se evitar alterações indevidas.

Assim, após um ativo ser registrado em um Blockchain, todas as transações com ele poderão ser rastreadas. Portanto, não fica difícil imaginar que Blockchain poderia ser utilizado para registrar RECs como tokens e controlar as operações sobre esses ativos. E no contexto do H₂V, essa combinação se mostra bastante promissora, pois possibilita obter maior segurança e transparência nas operações de Book and Claim.

Figura 5 - Implementação do Blockchain na Certificação do Hidrogênio



Fonte: (Autoria Própria, 2024).

3.2) Desenvolvimento de um código simplificado com Blockchain

Para a melhor compreensão do funcionamento desta rede, foi construída uma simulação em ambiente *Python*, onde contratos inteligentes regulam um ambiente de contratação de energia renovável, bem como regulam a venda de H₂V proveniente dessa energia. Para isso, foi assumida a relação aproximada de 55 MWh de energia consumida, para 1 tonelada de H₂ produzido utilizando o processo de eletrólise. Importante salientar também que essa relação pode sofrer mudanças ao considerar diferentes rotas e catalisadores para o processo de eletrólise do hidrogênio.

A fim de se realizar uma simulação simplificada, assumiu-se que todos os players poderiam produzir energia renovável ou comprá-la, e posteriormente vender o hidrogênio verde. Não sendo assim possível comprar H₂ ou vender energia no escopo definido da simulação. A partir disso as operações validariam a quantidade de energia disponível para cada player antes de registrar uma venda certificada de H₂V no Blockchain. O código da simulação pode ser encontrado no link: <https://github.com/Eric-Salge/Simulacao--blockchain>.

4) RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1) Simulação do código simplificado com Blockchain

O código pode ser demonstrado nas figuras a seguir, onde é possível verificar o funcionamento da estrutura simulada. No exemplo da Figura 6, o player H primeiramente insere uma tentativa de compra de 100 MWh no sistema, a compra é permitida e o registro é adicionado à Blockchain, gerando o log abaixo:

Figura 6 – Simulação de compra de 100 MWh do sistema pelo player H

```
Escolha o jogador (A-T): H
Escolha o tipo de contrato (buy/sell): buy
Digite a quantidade (em toneladas ou MWh): 100
Digite a senha: H1234
Transação assinada por H.
Contrato adicionado à blockchain.

Cadeia de Blocos:
[
  {
    "index": 1,
    "timestamp": 1705447603.1075904,
    "transactions": [],
    "previous_hash": "1"
  },
  {
    "index": 2,
    "timestamp": 1705447621.7759955,
    "transactions": [
      {
        "player": "H",
        "contract_type": "buy",
        "amount_h2": null,
        "amount_energy": 100.0,
        "password": "H1234"
      }
    ],
    "previous_hash": "5467af6ca580bc0a37812d4f93cb251cdc5cc664d8f7675124e0bcc80f5d290e"
  }
]
```

Fonte: (Autoria Própria, 2024).

Após a compra de 100 MWh de energia renovável, o player insere a venda de 1 tonelada de H₂V no sistema, que faz a equivalência energética de 55 MWh para 1 tonelada de H₂V e libera essa venda para registro no sistema, como observado na Figura 7.

Figura 7 – Simulação da venda bem sucedida de 1 tonelada de H₂V pelo player H

```
Deseja fazer outra transação? (Sim/Não): Sim
Escolha o jogador (A-T): H
Escolha o tipo de contrato (buy/sell): sell
Digite a quantidade (em toneladas ou MWh): 1
Digite a senha: H1234
Transação assinada por H.
Contrato adicionado à blockchain.
```

Cadeia de Blocos:

```
[
  {
    "index": 1,
    "timestamp": 1705447603.1075904,
    "transactions": [],
    "previous_hash": "1"
  },
  {
    "index": 2,
    "timestamp": 1705447621.7759955,
    "transactions": [
      {
        "player": "H",
        "contract_type": "buy",
        "amount_h2": null,
        "amount_energy": 100.0,
        "password": "H1234"
      }
    ],
    "previous_hash": "5467af6ca580bc0a37812d4f93cb251cdc5cc664d8f7675124e0bcc80f5d290e"
  },
  {
    "index": 3,
    "timestamp": 1705447657.9086983,
    "transactions": [
      {
        "player": "H",
        "contract_type": "sell",
        "amount_h2": 1.0,
        "amount_energy": null,
        "password": "H1234"
      }
    ],
    "previous_hash": "5185dd351e10fd45caeale7db130185a9f60de5f26a8a16004cd1c06256bda3f"
  }
]
```

Fonte: (Autoria Própria, 2024).

Além do sistema de validação para registro, esses logs evidenciam a estrutura de blocos que dá nome a esse tipo de cadeia de dados, sendo que cada transação gera novos blocos que não podem ser editados ou apagados do conjunto.

No caso de uma tentativa de ataque, a tecnologia de Blockchain se utiliza da técnica do consenso entre seus nós para validar a informação e impedir a interferência de um nó comprometido no sistema, podendo inclusive romper a conexão desse nó vulnerável com o resto da estrutura. Desse modo, como ilustrado na Figura 8, verifica-se um ataque simulado e a resposta da rede à essas condições:

Figura 8 – Simulação de ataque à estrutura do Blockchain

```
Escolha o nó alvo (n1-n9): n1
Simulando ataque ao nó n1.
Conteúdo do nó antes do ataque: {
  "player_H_energy": 100
}
Conteúdo do nó após o ataque: {
  "player_H_energy": 10000
}
Inconsistência detectada no nó n1. Removendo da blockchain.
Nó n1 removido da blockchain.

Cadeia de Blocos:
[
  {
    "index": 1,
    "timestamp": 1707602468.7281833,
    "transactions": [],
    "previous_hash": "1"
  }
]

Deseja fazer outro ataque? (Sim/Não): Não
```

Fonte: (Autoria Própria, 2024).

4.2) Comparação da tecnologia Blockchain versus Book and Claim

A metodologia Book and Claim, amplamente adotada no contexto dos certificados de energia renovável e atualmente utilizada na certificação do H2V pela CCEE, possibilita a separação entre a produção de energia limpa e sua entrega física aos consumidores. Os certificados são registrados de forma sistemática em um livro-razão, proporcionando aos consumidores a oportunidade de reivindicar ou adquirir esses certificados para compensar suas emissões de carbono. Essa abordagem busca promover transparência na gestão dos certificados e incentivar a conscientização e participação ativa em práticas sustentáveis.

A distinção significativa entre essa abordagem e o uso de Blockchain reside na segurança e autenticidade da informação registrada. A natureza distribuída e hierárquica das redes Blockchain assegura a virtual imutabilidade dos contratos registrados. Mesmo em caso de um ataque bem-sucedido contra as defesas de um nó, existem cópias idênticas da informação distribuídas pela rede, tornando inviável a exclusão ou edição de blocos. Portanto, essa tecnologia é amplamente empregada em aplicações que requerem simultaneamente segurança robusta e uma estrutura distribuída, como no domínio das criptomoedas.

Além disso, essa descentralização do Blockchain reduziria a atuação de autoridades centrais, promovendo a desintermediação de processos e, conseqüentemente, reduziria o custo das operações, ao reduzir o espaço para manipulações, erros e omissões das grandes empresas geradoras e distribuidoras.

Entretanto, a implementação de uma rede Blockchain acarreta também desvantagens, sendo a principal delas a necessidade de utilizar algoritmos de prova de trabalho (PoW) para a adição de novos blocos à rede, um processo conhecido como "mineração" no contexto de criptomoedas. Esses algoritmos impõem desafios computacionais complexos a máquinas poderosas, demandando considerável esforço computacional, o que resulta no aumento do consumo energético, na redução da vida útil do equipamento e, globalmente, no acréscimo dos custos operacionais e de manutenção de uma rede Blockchain. Além disso, devido a sua estrutura de imutabilidade, operações problemáticas teriam que ser refeitas e não seria possível apagar a operação defeituosa, apenas marcá-la, ficando ambos presentes na estrutura do Blockchain.

5) CONCLUSÃO

A certificação da energia renovável tem sido um dos pilares da transição para uma economia de baixo carbono, evitando fraudes e incongruências, permitindo assim que agentes invistam capital de forma segura e confiável nos chamados empreendimentos verdes, acelerando desse modo, o processo de transição energética.

Nesse contexto, estamos diante do desafio de regular o processo de certificação da origem do H₂, uma das maiores apostas energéticas do Sec XXI. Essa regulação não ocorrerá de forma instantânea, havendo ainda diversas dificuldades técnicas e comerciais no caminho para a consolidação de uma maneira única de classificação.

Todavia apesar das dificuldades, o cenário brasileiro apresenta enorme potencial, pois o país não só é cotado como um candidato ao futuro ranking dos maiores produtores de H₂V do mundo, mas também possui uma regulação e controle primoroso do mercado energético. Visto que, a CCEE possui a centralização de todos os contratos de energia, tanto nos ambientes de contratação livre quanto regulada, além da entidade já possuir um manual de certificação da origem do H₂ baseada na política de Book and Claim.

Assim, ao associarmos o sistema atual à tecnologia de Blockchain, considerada ferramenta chave para acelerar o processo de descarbonização da economia, por proporcionar rastreabilidade, segurança e rapidez nas transações de energia verde de forma mais eficiente, flexível e transparente, esta tecnologia também possui o diferencial de garantir a imutabilidade de registros através do sistema de livro razão distribuído. Dado este contexto, é possível verificar que ao combinar essas tecnologias ao modelo atual, garantimos um bom grau de confiabilidade, contribuindo para a revolução energética urgente que precisamos.

REFERÊNCIAS

ACCIONA. **Hidrogênio Verde: Rastreabilidade com blockchain.** 2023. Disponível em: <https://solucoes.acciona-energia.com/hidrogenio-verde/rastreabilidade-com-blockchain/>.

Canal Energia. **Blockchain pode influenciar o mercado de energia renovável?**. 2018. Disponível em <https://www.canalenergia.com.br/artigos/53064423/blockchain-pode-influenciar-o-mercado-de-energia-renovavel>.

Canal Energia. **SAP e GIZ auxiliam empresas brasileiras a exportarem H2 Verde.** 2023. Disponível em <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53240867/sap-e-giz-auxiliam-empresas-brasileiras-a-exportarem-h2-verde>.

CCEE. **Manual para certificação do hidrogênio.** Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. 2023a. Disponível em <https://www.ccee.org.br/documents/80415/919444/Manual%20para%20a%20Certificação%20de%20Hidrogênio%20REV1.1.docx/3b73a55e-3ed3-aeb1-8c92-e6d9c6b8a8d2>.

ENGIE. **Blockchain entra em ação para revolucionar o mercado de energia renovável.** 2020. Disponível em <https://www.alemdaenergia.engie.com.br/blockchain-energia-renovavel/>.

EPE. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio.** 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/>.

GESEL. **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil.** 2023. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/livros/>.

GUBAN, Dorottya; MURITALA, Ibrahim Kolawole; ROEB, Martin; SATTLER Christian. **Assessment of sustainable high temperature hydrogen production technologies.** 2020. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 49: pp. 26156-26165.

HUERTA, Laura Sánchez de Rojas. **Certifying green hydrogen's origin through blockchain.** 2021. Thesis (Master thesis), E.T.S. de Ingenieros Informáticos (UPM). Disponível em https://oa.upm.es/68722/1/TFM_LAURA_SANCHEZ_DE_ROJAS_HUERTA.pdf

IBM. **O que é a tecnologia blockchain?**. 2023. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/what-is-blockchain>.

IEA, 2023. **Global Hydrogen Review 2023.** International Energy Agency. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8d434960-a85c-4c02-ad96-77794aaa175d/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

IEA. **Hydrogen production costs by production source.** International Energy Agency. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-by-production-source-2018>. Última atualização em 6 de março de 2020.

IEA. **The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities.** International Energy Agency. 2019. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>.

IRENA. **Hydrogen: A renewable energy perspective.** International Renewable Energy Agency. 2019. (Report prepared for the 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting in Tokyo, Japan). Abu Dhabi.

KAYFECI, Muhammet; KEÇEBAŞ, Ali; BAYAT, Mutlucan. **Chapter 3 - Hydrogen production**. 2019. Pages 45-83. In: Solar Hydrogen Production. Editor(s): Francesco Calise, Massimo Dentice D'Accadia, Massimo Santarelli, Andrea Lanzini, Domenico Ferrero. Academic Press, ISBN 9780128148532, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128148532000035>.

MARIN NETO, Antonio José; DA SILVA, Ennio Peres; CAMARGO, João Carlos; NEVES JR., Newton Pimenta; PINTO, Cristiano Da Silva. **Produção de hidrogênio através da reforma-vapor do etanol para aplicações em células a combustível**: Protótipo de primeira geração. 2004. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/AGRENER2004/Fscommand/PDF/Wicac/13-\%20AntonioJMarinNeto.pdf>. AGRENER GD 2004 - 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída.

MME. **Programa Nacional do Hidrogênio**. Ministério de Minas e Energia. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2/HidrogênioRelatriodiretrizes.pdf>

SANTOS, Carlos. **Blockchain no setor elétrico**: aplicações e impactos da tecnologia. 2022. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/author/carlos-jose/>

VENTURUS. **Blockchain e a tokenização de certificados de energia renovável**. 2020. Disponível em <https://www.venturus.org.br/blockchain-e-a-tokenizacao-de-certificados-de-energia-renovavel/>.



I SEMINÁRIO NACIONAL DE HIDROGÊNIO VERDE SENAHIDRO

Ciência, Mercado e Tendências

27 e 28 maio/2024

Brasília - DF



ESCOLA DA
ENERGIA