



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
MESTRADO EM PROPRIEDADE INTELECTUAL E TRANSFERÊNCIA DE
TECNOLOGIA PARA INOVAÇÃO

IGOR MAIA GONÇALVES

Manual Regulatório de Geração de Energia a partir de Hidrogênio Verde

FORTALEZA – CE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G635m Gonçalves, Igor.

Manual Regulatório de Geração de Energia a partir de Hidrogênio Verde / Igor Gonçalves. - 2023.
55 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Propriedade Intelectual, Campus Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Tecia Vieira Carvalho.

Coorientação: Prof. Dr. Gloria Maria Marinho Silva.

1. Transição energética. 2. Rnergias renováveis. 3. Hidrogênio . 4. Regulação. 5. Tecnologia. I. Título.
CDD 346.048

IGOR MAIA GONÇALVES

Manual Regulatório de Geração de Energia a partir de Hidrogênio Verde

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em
Programa de Pós-Graduação em
Propriedade Intelectual e
Transferência de Tecnologia para
Inovação – PROFNIT – Ponto Focal
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Ceará

Orientadora: Profa. Dra. Tecia Vieira
Carvalho

Coorientadora: Profa. Titular Gloria
Maria Marinho Silva.

RESUMO

A utilização do hidrogênio verde como vetor de viabilização da transição energética, em panorama nacional e internacional, tem sido relevante pauta dos governos e investidores ao redor do mundo, com destaque para o Brasil, que identificou este como um mercado estratégico para o plano de desenvolvimento nacional. O país, historicamente, possui protagonismo na geração de energia a partir de fontes renováveis, o que viabiliza seu potencial de exploração do hidrogênio. O objetivo deste trabalho foi elaborar um Manual Regulatório de Geração de Energia a partir de Hidrogênio Verde, para apoiar investidores e órgãos públicos no desenvolvimento deste mercado. A pesquisa iniciou com o estudo bibliográfico do cenário atual do mercado de hidrogênio verde e suas perspectivas para o futuro próximo, considerando a evolução das diretrizes legais para a regulação deste setor, além dos desafios tecnológicos para a implementação da devida cadeia produtiva, bem como os principais indicadores internacionais para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde, avaliando-se os desafios comuns para a comunidade mundial; foi realizado um levantamento documental relacionado aos estudos e relatórios atualmente em curso e instituições ligadas ao assunto; sendo este um setor incipiente na sua concepção, os aspectos de inovação tecnológica e cooperação internacional são essenciais para o desenvolvimento conjunto e concatenado do mercado; na perspectiva brasileira, a regulação da atividade de produção do composto, bem como as normas de certificação exigidas, se apresentam como importantes quesitos para que os investidores encontrem a segurança jurídica adequada para seus aportes. Na conclusão final foi entregue um manual para a implantação de uma planta de produção de hidrogênio verde, considerando o arcabouço legislativo vigente no estado do Ceará. Os resultados obtidos indicaram que o mercado de produção de hidrogênio possui grande potencial de desenvolvimento e atração de investimentos, contudo, há desafios tecnológicos para a cadeia produtiva, bem como legais para a construção de um ambiente juridicamente seguro para este setor.

Palavras-Chave: transição energética; energias renováveis; hidrogênio verde; tecnologia; regulação.

ABSTRACT

The use of green hydrogen as an enabling factor in the energy transition, both nationally and internationally, has been a relevant topic for governments and investors worldwide, with a particular emphasis on Brazil, which has identified it as a strategic market for national development plans. Historically, the country has been a leader in renewable energy generation, which enables its potential for hydrogen exploration. This study aimed to develop a Regulatory Manual for Green Hydrogen Energy Generation to support investors and public agencies in the development of this market. The research began with a bibliographic study of the current scenario of the green hydrogen market and its prospects for the near future, considering the evolution of legal guidelines for regulating this sector, as well as the technological challenges for implementing the appropriate production chain. It also examined key international indicators for the development of the green hydrogen market, evaluating common challenges faced by the global community. A documentary survey was conducted on ongoing studies and reports from relevant institutions in the field. Given that this is still an emerging sector, technological innovation and international cooperation are essential for the coordinated and joint development of the market. From a Brazilian perspective, regulation of hydrogen production activities, as well as the required certification standards, are important factors for investors to find the appropriate legal security for their investments. In the final conclusion, a manual was provided for the implementation of a green hydrogen production plant, considering the current legislative framework in the state of Ceará. The results indicated that the hydrogen production market has significant potential for development and attracting investments. However, there are technological challenges in the production chain as well as legal challenges in constructing a legally secure environment for this sector.

Keywords: energy transition; renewable energies; green hydrogen; technology; regulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ILUSTRAÇÃO 1	Quadro de estratégia do Pacto Global.....	12
ILUSTRAÇÃO 2	Objetivos De Desenvolvimento Sustentável.....	13
ILUSTRAÇÃO 3	Entidades internacionais ligadas ao setor de hidrogênio.....	14
ILUSTRAÇÃO 4	Classificação do hidrogênio por cores.....	16
ILUSTRAÇÃO 5	Demanda de usuário final de hidrogênio por segmento.....	19
ILUSTRAÇÃO 6	Demanda de usuário final de hidrogênio por região.....	19
ILUSTRAÇÃO 7	Setores da energia hoje e amanhã.....	20
ILUSTRAÇÃO 8	Participação de patentes internacionais e tecnologias por região e cadeia produtiva.....	23
ILUSTRAÇÃO 9	Eixos do Programa Nacional de Hidrogênio.....	26
ILUSTRAÇÃO 10	Requisitos de qualificação do hidrogênio verde em âmbito global.....	29
ILUSTRAÇÃO 11	Mapa de recursos solares e eólicos.....	32
ILUSTRAÇÃO 12	Mapa do Complexo do Pecém.....	34
ILUSTRAÇÃO 13	Fluxograma metodológico.....	36
ILUSTRAÇÃO 14	Iniciativas de promoção do hidrogênio e participação brasileira	39
ILUSTRAÇÃO 15	Complementaridade de geração eólica e solar.....	41
ILUSTRAÇÃO 16	Empreendimentos eólicos e solares no Ceará.....	41
ILUSTRAÇÃO 17	Localização estratégica do Estado do Ceará.....	42
ILUSTRAÇÃO 18	Dados do Porto do Pecém.....	43
ILUSTRAÇÃO 19	Porto do Pecém – Ceará.....	43
ILUSTRAÇÃO 20	Memorandos assinados pelo Governo do Ceará.....	45
ILUSTRAÇÃO 21	Especificações gerais para certificação do hidrogênio verde.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	07
2	OBJETIVO.....	09
2.1	OBJETIVO GERAL.....	09
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	09
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
3.1	O HIDROGÊNIO VERDE.....	15
3.1.1	Uso do hidrogênio verde.....	18
3.2	COOPERAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA.....	21
3.3	O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E O PAPEL DO GOVERNO.....	24
3.4	ASPECTOS LEGAIS.....	25
3.5	CERTIFICAÇÃO.....	28
3.5.1	Rastreabilidade da energia elétrica utilizada no processo produtivo	30
3.6	INSERÇÃO DO ESTADO DO CEARÁ NO MERCADO DE HIDROGÊNIO.....	31
3.6.1	Diferenciais competitivos do Estado do Ceará.....	33
4	METODOLOGIA.....	36
4.1	MÉTODOS INICIAIS.....	36
4.2	ABORDAGEM.....	36
4.3	COLETA DE DADOS.....	37
4.4	ANÁLISE DOS DADOS.....	37
5	RESULTADOS.....	38
5.1	INICIATIVAS RELACIONADAS AO DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE.....	39
5.1.1	Perspectivas para o Estado do Ceará.....	40
5.2	DIRETRIZES REGULATÓRIAS NO BRASIL.....	45
5.3	CERTIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE.....	47
6	CONCLUSÃO.....	49

1. INTRODUÇÃO

Num contexto de ampla discussão acerca das agendas de sustentabilidade na comunidade internacional, a questão da produção de energia elétrica se apresenta como um dos principais pilares em pauta. Com expectativa de aumento contínuo do consumo de eletricidade em razão da ampliação da demanda de mercado, muitos países estão se comprometendo a adotar fontes de energia limpa e renovável visando reduzir a emissão de dióxido de carbono.

O setor de energia é responsável por cerca de 75% das emissões de gases de efeito estufa, pelo que, atualmente, desempenha um papel crucial na avaliação dos impactos mais graves verificados em função das mudanças climáticas (IEA, 2021). Neste contexto, tem sido observado um crescente consenso político em torno das metas de redução de emissões e consequentes iniciativas para promover as mudanças necessárias na busca do equilíbrio ambiental adequado.

Apesar dos diversos e significativos obstáculos em questões tecnológicas e de mercado, o hidrogênio vem emergindo como um eixo estratégico de governos e empresas em todo o mundo, com o reconhecimento do seu notório potencial e capacidade de causar grandes transformações no futuro. É neste contexto que o mercado de hidrogênio está prestes a ganhar um impulso significativo, reflexo das políticas energéticas pós-pandemia, que visam a recuperação econômica e a aceleração da transição energética a nível global.

Em recente levantamento realizado, verificou-se que, em 2021, o mercado global de hidrogênio foi avaliado em aproximadamente USD 3.2 milhões (GRAND VIEW RESEARCH, 2020). Além disso, espera-se um crescimento expressivo nos próximos anos, com estimativas de crescimento a uma taxa anual de 39,5% entre os anos de 2022 e 2030 (GRAND VIEW RESEARCH, 2020). Esse crescimento é impulsionado pela visão compartilhada por governos e empresas de que o hidrogênio é essencial para viabilizar uma profunda descarbonização da economia mundial, conforme estabelecido pelas metas do Acordo de Paris até 2050.

O hidrogênio tem a capacidade de ser usado diretamente em setores que são difíceis de eletrificar, além de servir como um meio de armazenamento de energia, devido à sua possibilidade de utilização como combustível. Isso permite uma maior integração de fontes renováveis variáveis, como energia eólica e solar. Nesse sentido,

o hidrogênio é considerado um recurso que pode facilitar a conexão entre os mercados de combustíveis, energia elétrica, indústria e outros setores.

Com base nesses levantamentos, o presente trabalho visou reunir os principais desdobramentos deste mercado, em perspectiva nacional e internacional, incluindo a análise jurídica das questões que envolvem seu desenvolvimento e implementação, a fim de apresentar subsídios para que este setor, com base nas diretrizes em curso para a sua consolidação.

Para a análise legal, serão considerados os aspectos tributários, urbanísticos e regulatórios para empreendimentos desta natureza. Ademais, tendo em vista que parte dos aspectos abordados estão sujeitos à jurisdição legislativa de competência estadual e municipal, abordaremos o tema considerando o Estado do Ceará, Município de Caucaia.

Por fim, para a análise ora tratada, não serão avaliadas eventuais interferências, ainda que indiretas ou parciais, em áreas indígenas, quilombolas, unidades de conservação ou com qualquer outro tipo de limitação legal ao seu uso.

Ao final, será apresentado um manual com todas as etapas, licenças e autorizações atualmente necessárias para a implantação de uma planta de produção de hidrogênio, considerando o recorte normativo do Estado do Ceará.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Apoiar investidores e órgãos públicos no desenvolvimento do mercado de Hidrogênio Verde através da elaboração de um Manual Regulatório para produção e uso deste produto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Identificar e catalogar as iniciativas a nível internacional relacionadas ao desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde;
- II. Mapear as principais diretrizes regulatórias editadas e em edição no Brasil;
- III. Realizar uma análise comparada de normas nacionais e internacionais para enquadramento técnico e certificação do hidrogênio verde,
- IV. Elaborar manual, com *roadmap*, de todo o processo legal para implantação de uma planta de hidrogênio no Brasil, em recorte específico da legislação cearense.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Ao longo das últimas décadas, governos e mercados vem fazendo uma clara mudança de rota nas suas agendas para a inclusão de pautas de sustentabilidade, em toda a pluralidade de temas abarcados, sendo esta uma temática com forte apelo político, econômico e social, seja na perspectiva de políticas públicas (nacionais e internacionais), seja no cenário corporativo e de investimentos.

A sustentabilidade tem se distanciado do seu viés exclusivamente altruísta e voluntário, para se tornar uma necessidade a nível mundial, com expressiva importância mercadológica, o que reverbera na demanda por políticas públicas e regulamentação alinhadas com esta estratégia de desenvolvimento.

Como reflexo direto, observa-se que o mercado financeiro global tem experimentado um aumento exponencial em investimentos sustentáveis, uma abordagem que considera os fatores ambientais, sociais e de governança na seleção e gestão de portfólios (Avramov *et al.*, 2022)

No período pós pandêmico, esta preocupação ganhou novas proporções. O olhar para a sustentabilidade segue transcendendo as exigências legais de cada jurisdição, passando a ser uma demanda de mercado e consumo.

Mesmo enfrentando muitos desafios pós-pandemia, os conselhos administrativos e os CEOs também estão sendo incumbidos pelos stakeholders de melhorar o desempenho ambiental, social e de governança (ESG) de suas empresas. Melhorar o desempenho corporativo de ESG envolve reduzir os danos que as empresas causam à sociedade por meio do aumento de investimentos em projetos sustentáveis que reduzem as emissões de carbono, a poluição e o desperdício, ao mesmo tempo em que melhoram o bem-estar dos funcionários, a diversidade e o impacto na comunidade. (Sheehan *et al.*, 2023. Tradução nossa)

Esta atenção especial reflete uma mudança de paradigma na mentalidade de consumo e investimento, passando a ser um critério importante na tomada de decisões de mercado. Percebe-se que esta análise e valoração extrapola os critérios objetivos de desempenho, retorno e funcionalidade dos produtos e investimentos, envolvendo também a sua contribuição para a promoção de um modelo de negócios responsável e comprometidos com seus impactos.

O valor que os consumidores-investidores atribuem aos produtos ambientalmente sustentáveis e, portanto, uma medida de seu mandato verde,

pode ser extraído por meio de análises empíricas ou experimentos de campo. Alguns estudos recentes (Hainmuller *et al.*, 2015; Becchetti *et al.*, 2018) fornecem evidências sobre os valores que os consumidores atribuem à origem ética dos produtos. Eles aplicaram diversos tratamentos a uma ampla gama de produtos verdes e testaram o impacto de uma forma simples de publicidade em produtos ambientalmente responsáveis, com e sem aumento de preços, para mostrar que informações públicas sobre metas ambientais corporativas geram mudanças significativas na demanda por esses produtos (Agliardi & Agliardi, 2019. Tradução nossa)

Neste contexto, a demanda pela redução de emissões de gases do efeito estufa tem se sobressaído, sobretudo em setores da economia que, historicamente, tem uma grande parcela da emissão de poluentes, notadamente as atividades industriais e de transporte, que demandam um processo de descarbonização em grande escala.

Sob o ponto de vista normativo, os acordos internacionais têm um papel importante nesse ecossistema, pois refletem um panorama mundial de interesses comuns, além de poder ter aplicabilidade mandatória, dependendo da forma de adesão dos governos signatários.

Dentre as frentes observadas, destaque-se o Acordo de Paris, negociado em 2015 por 196 países na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, do qual o Brasil é parte, ratificando o compromisso mundial para conter as alterações climáticas, com a definição de metas para a redução da emissão de gases do efeito estufa.

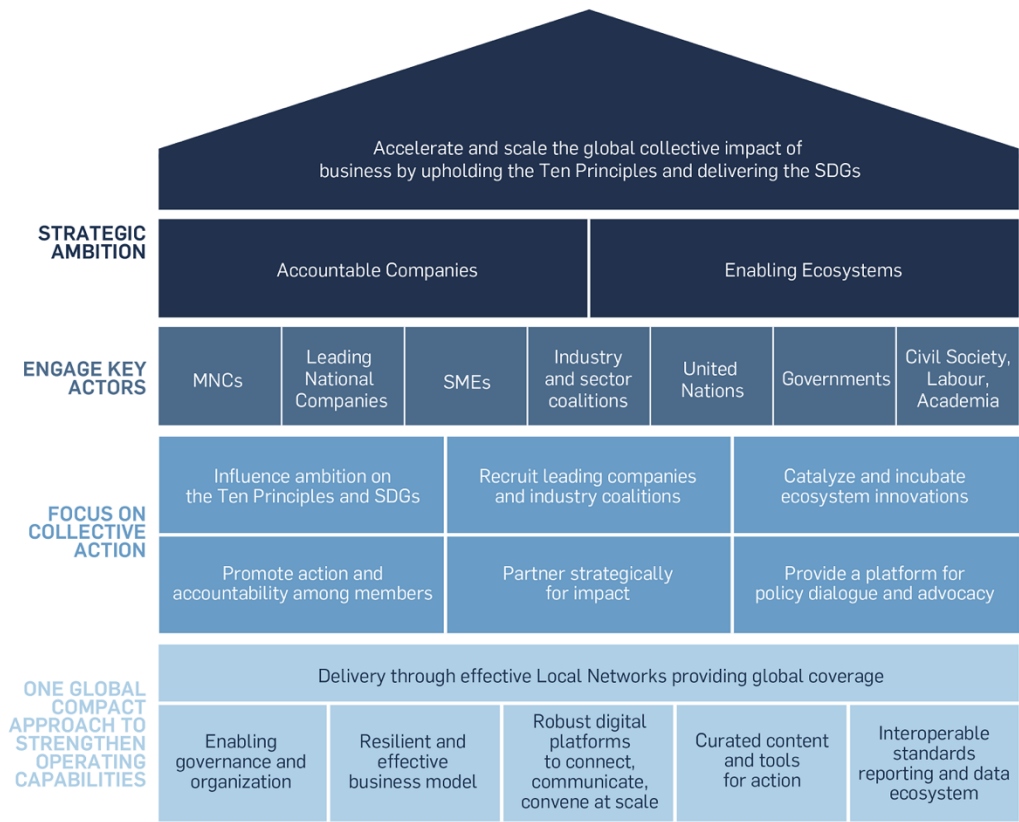
Uma análise mais detalhada do Acordo de Paris revela por que ele se assemelha a uma ferramenta central de gestão legal para esforços globais relacionados à mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Ele formula uma meta coletiva acordada internacionalmente, mas depende da determinação nacional das contribuições individuais para mitigação e adaptação; revisão de conformidade institucionalizada é limitada e conta apenas com um procedimento de não conformidade facilitador; e as ações das partes não acarretam responsabilidade estabelecida pelo próprio tratado em relação a perdas e danos. Por outro lado, há um alto grau de detalhamento das obrigações processuais e um sofisticado "mecanismo de avanço" projetado para influenciar a tomada de decisões dos Estados individuais. Esse mecanismo é acompanhado por um alto padrão de transparência estabelecido pelo Acordo de Paris. (Wegener, 2020. Tradução nossa)

Nota-se, assim, que apesar das questões de soberania nacional para definição das rotas e iniciativas de desenvolvimento de cada país, o acordo possui capacidade de reverberação política e com potencial de ensejar diretrizes normativas para seus signatários.

No mesmo sentido, também tem grande relevância os programas de adesão voluntária, que igualmente ajudam a compor o ambiente que se tenta fomentar, a exemplo do Pacto Global, implementado pela Organização das Nações Unidas - ONU, como um chamamento à sociedade civil, sobretudo à iniciativa privada, para adotar práticas que se alinhem com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS, através de um olhar responsável sobre o ambiente de negócios mundial, propondo que as corporações alinhem as suas estratégias comerciais a questões ambientais, sociais e de governança.

Baseado em 10 princípios fundamentais, o Pacto Global da ONU aborda a sustentabilidade corporativa na perspectiva da forma de fazer negócio pelas companhias, observando as responsabilidades fundamentais dos seus impactos na sociedade, tendo sua estratégia sistêmica refletida na Ilustração 1:

ILUSTRAÇÃO 1 - Quadro de estratégia do Pacto Global



Fonte: Global Compact. UN Global Compact Strategy. 2021.

De acordo com dados coletados pela ONU, nos últimos 20 anos o Pacto

Global cresceu para se tornar hoje a maior iniciativa de sustentabilidade corporativa do mundo, representando um movimento global de mais de 12.000 empresas em 160 países (ONU. Global Compact Strategy. 2023).

Compondo o mesmo ecossistema, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável se refletem em 17 metas interconectadas associadas ao cumprimento da sua agenda de sustentabilidade, como um apelo mundial para o enfrentamento dos principais desafios identificados para o horizonte das próximas décadas, sendo o desenvolvimento de energias limpas um deles (Ilustração 2):

ILUSTRAÇÃO 2 – Objetivos De Desenvolvimento Sustentável



Fonte: United Nation. 2018

Todas essas iniciativas guardam forte sinergia com os setores de energia e combustíveis, tendo em vista que a transformação energética é um dos principais pilares do processo de descarbonização em escala global.

Embora a energia seja necessária para o desenvolvimento econômico, ela também pode ser a fonte fundamental de degradação ambiental. A interação entre energia e meio ambiente se tornou uma consideração importante tanto para governos quanto para pesquisadores, e de acordo com vários pesquisadores, os efeitos negativos no meio ambiente derivam da energia não renovável, não da energia renovável. Portanto, aumentar o consumo de energia renovável em vez de energia não renovável tem muitas vantagens potenciais, incluindo a mitigação das emissões de aquecimento global, diversidade de fontes de energia e

diminuição da dependência de energia não renovável.
(Djellouli *et al.*, 2022 Tradução nossa)

É neste cenário que o hidrogênio tem se apresentado como fonte alternativa de grande potencial para viabilizar as metas propostas. Entre as opções de energia disponíveis, o uso do hidrogênio como combustível é bastante atrativo e promissor devido ao fato de que sua combustão é limpa, gerando como produto apenas a água. Os sistemas de energia baseados neste elemento têm sido vistos como uma possível substituição para os combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que promovem a sustentabilidade energética e ambiental a longo prazo (Aditiya & Aziz, 2021).

Integrando essa ambiência, entidades correlatas a este ecossistema foram criadas para somar esforços no desenvolvimento de soluções para a transformação energética mundial através do hidrogênio, dentre as quais se destaca o *Hydrogen Council*, criado em 2017 na Suíça, o qual vem desenvolvendo importantes estudos entre seus mais de 150 membros, segundo dados da própria entidade.

Ademais, cabe menção ao programa multigovernamental denominado *Hydrogen Initiative*, que agrega países para o desenvolvimento de políticas e iniciativas para acelerar a comercialização e utilização do hidrogênio entre suas áreas da economia como propulsor para a transição energética de matrizes limpas.

Outras organizações e entidades foram verificadas em âmbito internacional, tal como elenca Furat Dawood (Ilustração 3).

ILUSTRAÇÃO 3 – Entidades internacionais ligadas ao setor de hidrogênio

Table 3 – National and International hydrogen frameworks, organizations and councils ^a .		
Body	Location	website
IEA Hydrogen	Global	http://ieahydrogen.org/
Hydrogen Council	Global	http://hydrogencouncil.com/
The International Centre for Hydrogen Energy Technologies (ICHET)	UNIDO	https://www.unido.org/
International Association for Hydrogen Energy (IAHE)	Global	http://www.iahe.org/
Hydrogen Foundation	Spain	http://hidrogenoaragon.org/en/
Hydrogen Europe	Europe	https://hydrogeneurope.eu/
National Hydrogen Association (NHA)	USA	http://www.hydrogenassociation.org/
The Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (FCHEA)	USA/Global	http://www.fchea.org/
The Hydrogen South Africa (HySA)	Africa	https://www.hysa-padep.co.za/
Renewable Hydrogen Council	WA-Australia	http://www.drd.wa.gov.au/projects/EnergyFutures/Pages/Renewable-Hydrogen-Conference.aspx
The Australian Association for Hydrogen Energy (AAHE)	Australia	http://www.hydrogenaustralia.org/
The U.S. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program	USA	https://www.nrel.gov/hydrogen/
Canadian hydrogen and fuel cell industry	Canada	http://www.chfca.ca/

^a This table includes some examples; while there are many other national level entities and think tanks working in the same direction.

Fonte: Furat Dawood. Hydrogen Energy Publications. 2019.

Confirmando a tendência internacional deste setor, de acordo com dados

levantados pelo *Hydrogen Council, McKinsey & Company*, até 2021 mais de 30 países editaram suas estratégias nacionais de desenvolvimento através da utilização do hidrogênio. Em perspectivas industriais de mercado, mais de mais de 520 projetos em larga escala com utilização de baixo carbono e hidrogênio renovável foram anunciados.

No Brasil, diferentes níveis de governo vêm implementando iniciativas para fomentar este mercado. Na esfera federal, foi lançado o Plano Nacional de Energia 2050, que traz o hidrogênio como um dos eixos de transformação energética no país, além das diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio, que pretende fomentar a utilização econômica desta fonte através do seu uso como vetor energético.

Em nível regional, diversos Estados Federativos estão se preparando para receber investimentos neste setor, com importante protagonismo do Ceará, que tem buscado manter sua vanguarda no desenvolvimento de fontes alternativas de energia limpa. Assim, em fevereiro de 2021, o Estado iniciou projeto de criação de um *Hub* de Hidrogênio Verde, a ser implantado no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, tendo firmado, até o momento, mais de 20 memorandos de cooperação com empresas interessadas no mercado de produção e exportação do produto.

Sob a perspectiva normativa local, no Ceará, o órgão responsável pela execução da Política Ambiental do Estado publicou, em fevereiro de 2022, os critérios e parâmetros aplicáveis ao licenciamento ambiental para empreendimentos de produção de hidrogênio verde no estado, assumindo o pioneirismo legislativo no país neste tema.

Diante de todo este cenário, sendo este um mercado incipiente, mas com expectativa de expressivos investimentos, a criação de um ambiente juridicamente propício e adequado é essencial para sua viabilização.

3.1 O HIDROGÊNIO VERDE

Antes de adentrarmos no mérito principal desta pesquisa, é importante elucidar alguns conceitos que a permeiam, iniciando pela própria definição do hidrogênio e suas classificações.

De acordo com tipo de produção utilizada, bem como com a fonte de extração, diferentes cores são atribuídas ao hidrogênio como critério de classificação. No entanto, cumpre esclarecer que não há, ainda, uma convenção de nomenclatura universal, pelo que os critérios de enquadramento por coloração podem mudar ao

longo do tempo e até mesmo entre países.

Documentos de política em todo o mundo se referem diretamente ou implicitamente ao hidrogênio verde, cinza, azul, turquesa, rosa e preto. É importante observar que algumas cores de hidrogênio possuem definições estabelecidas, enquanto definições inconsistentes podem ser encontradas para outras. Por exemplo, a DNV define o hidrogênio amarelo como aquele produzido por meio de eletrólise da água usando eletricidade da rede, enquanto a National Grid usa uma definição que afirma ser produzido exclusivamente por energia solar. Ambas as definições podem se enquadrar na definição de hidrogênio verde da CertifHy (Certificado de Origem). Além disso, diferentes definições de energia renovável são utilizadas ao redor do mundo, o que leva a diferentes definições para o hidrogênio verde. Fica claro que o hidrogênio verde possui uma ampla definição e têm sido feitos apelos para sua padronização em nível internacional. (Lubbe *et al.*, 2023. Tradução nossa)

Em âmbito acadêmico e mercadológico, as principais cores referidas são cinza, azul, turquesa, verde, rosa e amarelo, os quais são graficamente indicados na Ilustração 4, com seu respectivo processo produtivo (Ajanovic *et al.*, 2022):

ILUSTRAÇÃO 4 – Classificação do hidrogênio por cores

Hydrogen	Hydrogen produced by fossil fuels, mostly natural gas and coal, causing CO ₂ emissions in the process
Hydrogen	Hydrogen produced by fossil fuels in combination with CCS, reducing the GHG emissions of the process
Hydrogen	Hydrogen produced via pyrolysis of fossil fuels, where the by-product is solid carbon
Hydrogen	Hydrogen produced by electrolysis using electricity generated from RES
Hydrogen	Hydrogen produced by electrolysis using electricity from nuclear power plants
Hydrogen	Hydrogen produced by electrolysis using grid electricity

Fonte: International Journal of Hydrogen Energy. 2022

Na perspectiva do hidrogênio verde, a primeira menção a este conceito foi feita pela *National Renewable Energy Laboratory*, no ano de 1995, quando utilizou o termo hidrogênio renovável (produzido a partir de fontes renováveis) como referência ao hidrogênio verde. Posteriormente, em 2006, o governo do estado da Califórnia

usou a mesma nomenclatura para identificar o composto produzido de maneira limpa e sustentável, utilizando fontes renováveis, como energia solar ou eólica. Por fim, observou-se nova referência ao elemento nos documentos de políticas da União Europeia, em declaração feita pelo Parlamento Europeu em 2007, a qual tratava de diretrizes para estabelecer uma economia de hidrogênio verde na Europa (Velazquez Abad & Dodds, 2020).

Atualmente, apesar de não haver uma classificação oficial, o hidrogênio verde tem sido definido como aquele produzido através do uso de energia renovável, como a energia solar ou eólica, em processos de eletrólise da água.

Observe-se, contudo, que existem autores que entendem este conceito de maneira mais ampla, defendendo que o enquadramento do composto na categoria verde pode ser atribuído até mesmo quando a sua extração ocorre a partir de combustíveis fósseis, desde que todo e qualquer gás do efeito estufa gerado em seu processo seja devidamente capturado e processado.

Muitas substâncias encontradas na natureza contêm hidrogênio. Entre elas, a água, naturalmente encontrada como salmoura (água do mar), água de rio, água da chuva ou água de poço, é a mais abundante. O hidrogênio também pode ser extraído de hidrocarbonetos fósseis, biomassa, sulfeto de hidrogênio ou outras substâncias. Quando o hidrogênio é extraído de hidrocarbonetos fósseis, todo o dióxido de carbono deve ser processado (separado, sequestrado etc.) de forma que nenhum GEE (gás de efeito estufa) ou outros poluentes sejam emitidos na atmosfera, e o processo de extração de hidrogênio pode ser chamado de "verde". (Dincer, 2012. Tradução nossa)

Tal interpretação, contudo, já não corresponde à maioria dos autores da atualidade. No mesmo sentido, o conceito de mercado amplamente utilizado para tratar do hidrogênio verde se refere à utilização de eletricidade proveniente de fonte renovável para separar as moléculas de água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2).

O princípio da eletrólise da água consiste simplesmente em passar uma corrente elétrica contínua entre dois eletrodos imersos em um eletrólito para dividir a água eletroquimicamente. Para realizar isso usando eletricidade baseada em energia eólica, a energia na massa de ar é primeiro extraída pela turbina eólica e convertida em energia mecânica. A turbina eólica aciona o gerador elétrico por meio da caixa de engrenagens para produzir eletricidade. A função da caixa de engrenagens é igualar a velocidade lenta da turbina eólica à velocidade rápida do gerador elétrico. A eletricidade gerada é retificada para uma saída contínua adequada, e então utilizada para a eletrólise da água visando à produção de hidrogênio por meio do eletrólito, passando eletricidade através de dois eletrodos. (Ayodele & Munda, 2019. Tradução nossa)

Tal referência foi ratificado pelo Governo Brasileiro, através da Empresa de Pesquisa Energética, que indica que “o hidrogênio verde tem sido definido, no jargão de mercado, como aquele é o produzido de fontes renováveis variáveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água” (Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. P. 09). No mesmo sentido, o documento reforça que “a classificação do hidrogênio em cores apresenta definições diferentes dependendo da referência, ressalta-se que o hidrogênio obtido por outras rotas renováveis não tem sido incluído no conceito de hidrogênio verde”.

3.1.1 Uso do hidrogênio verde

O hidrogênio verde, enquanto composto com grande potencial de utilização como combustível, desempenha um papel fundamental como uma fonte de energia limpa e sustentável, com capacidade de aplicação direta em setores onde a eletrificação é um desafio.

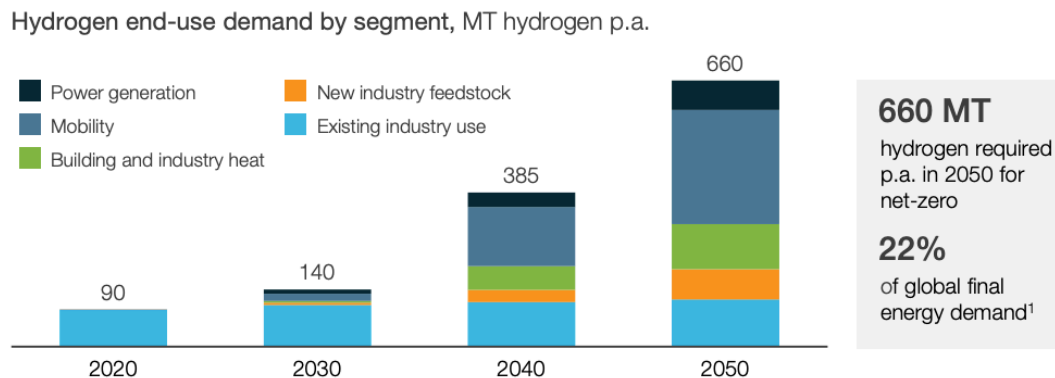
Uma alternativa aos combustíveis fósseis é o hidrogênio "verde", que pode ser produzido por meio da eletrólise da água, utilizando corrente elétrica para separar a água em hidrogênio e oxigênio, sem emissões de gases de efeito estufa, desde que a eletricidade utilizada no processo seja proveniente exclusivamente de fontes renováveis. A alta densidade de energia, o baixo peso e a fácil conversão eletroquímica do hidrogênio permitem que ele transporte energia por meio de gasodutos ou na forma de combustíveis líquidos, como amônia em navios de carga. Em diversos setores, o hidrogênio pode ser utilizado como matéria-prima química, queimado para gerar calor, utilizado como reagente na produção de combustíveis sintéticos ou convertido novamente em eletricidade por meio de células de combustível. Além disso, a capacidade de armazenamento de energia a longo prazo do hidrogênio em tanques ou cavernas subterrâneas faz com que seja uma das poucas tecnologias verdes capazes de armazenar energia ao longo das estações do ano. (Oliveira *et al.*, 2021. Tradução nossa)

As aplicações existentes e esperadas para o hidrogênio são diversas, com grande potencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, tendo em vista ser um material abundante e possuir maior conteúdo energético por peso, quase três vezes maior do que o conteúdo da gasolina. Com isso, verifica-se sua ampla viabilização para utilização como combustível no setor de transportes e indústrias que utilizam gás em seu processo produtivo.

Um levantamento realizado pelo Hydrogen Council, McKinsey & Company indicaram as perspectivas de uso do hidrogênio, por segmento, com a finalidade de

se atingir zero emissões de CO2 no horizonte de 2050, conforme Ilustração 5.

ILUSTRAÇÃO 5 – Demanda de usuário final de hidrogênio por segmento



1. IEA net-zero scenario with 340 EJ final energy demand in 2050. HHV assumed. Excluding power.

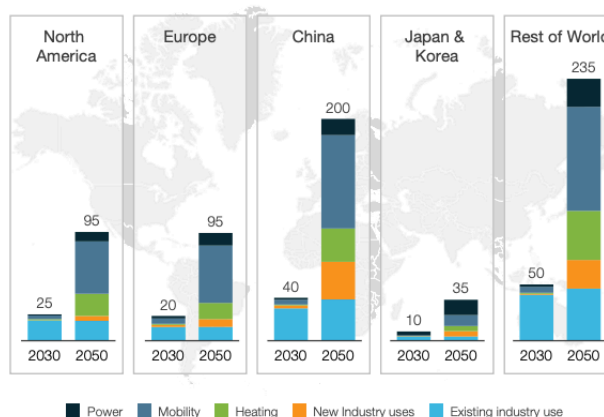
Fonte: Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen for Net-Zero. 2021

Pela análise dos dados coletados, verifica-se que o setor de transporte, geração de energia, construção e indústrias que utilizam calor em alto grau são os principais setores que devem considerar a transição energética para uso do hidrogênio.

Já no âmbito geográfico, o mesmo estudo aponta os principais mercados alvo para implementação da meta de zero emissões, como indica a Ilustração 6.

ILUSTRAÇÃO 6 - Demanda de usuário final de hidrogênio por região

Hydrogen end-use demand by region, MT hydrogen p.a.



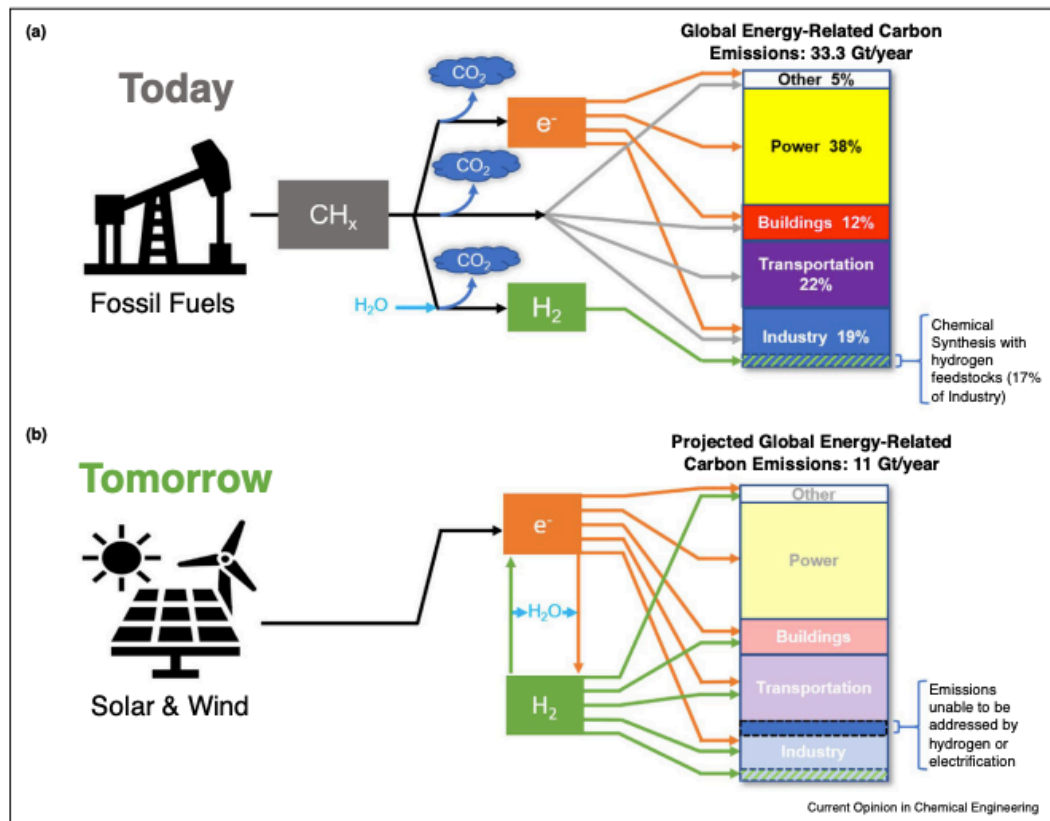
Fonte: Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen for Net-Zero. 2021

Ademais, outra importante aplicabilidade é seu uso como vetor de armazenamento de energia, permitindo a integração eficiente de fontes renováveis, como a eólica e solar.

O hidrogênio pode ser utilizado como um meio de armazenamento para eletricidade renovável intermitente e como um vetor de energia para áreas off-grid que necessitam de fornecimento de energia. Aqui, utilizamos o termo "vetor de energia" para se referir a uma substância rica em energia que facilita o transporte e/ou armazenamento de energia - na forma de hidrogênio gasoso, líquido, sólido, através de hidrogênio para produtos químicos, etc. - com a intenção de utilizá-lo em um momento e/ou localidade distantes do local de produção primária. O hidrogênio pode criar novas conexões entre pontos de oferta e demanda centralizados ou descentralizados. Isso potencialmente aumentará a flexibilidade do sistema energético como um todo. (Abdin *et al.*, 2020. Tradução nossa)

Essa versatilidade do hidrogênio o torna um recurso estratégico para promover a interconexão entre os mercados de combustíveis, eletricidade, indústria e outros setores econômicos.

ILUSTRAÇÃO 7 – Setores da energia hoje e amanhã



Energy sectors of today and tomorrow.

Energy sources and annual carbon dioxide emissions from various sectors compared for the society of 2021 and a future society which utilizes electrification and green hydrogen production from renewable energy to the highest extent. Hydrogen will play a role in sectors that are difficult to decarbonize, whereas electrification will be the predominant green solution where possible. The remaining 11 Gt CO_2 per year is due to chemical byproducts where carbon capture is the only currently developed solution. Future increases in demand are also taken into account.

Fonte: Current Opinion in Chemical Engineering 2021

Por fim, elenca-se como ponto estratégico desse mercado o seu papel na integração de fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, na rede elétrica. Isto porque, sendo a eletricidade um dos seus principais insumos para produção, a

demanda para matrizes renováveis, uma exigência para sua cadeia ser validada como “verde”, potencializa o crescimento do mercado de geração a partir de tais fontes.

3.2 COOPERAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA

Em razão da incipiência deste mercado, sobretudo no Brasil, espera-se que as pesquisas para desenvolvimento de tecnologias relacionadas à produção, armazenagem e transporte de hidrogênio verde sejam potencializadas nos próximos anos.

A geração de energia renovável, juntamente com as tecnologias de armazenamento de eletricidade e calor, evolui como pilares fundamentais do sistema global de fornecimento de energia na primeira metade do século 21 (Bogdanov *et al.*, 2021), pelo que a inovação tecnológica se mostra intrinsecamente alinhada neste processo.

Neste ponto, os desafios tecnológicos para a indústria de hidrogênio são um dos principais gargalos para sua viabilização, sendo a dificuldade de armazenamento e transporte um dos principais obstáculos atualmente enfrentados.

Desnecessário repetir que o hidrogênio é um excelente combustível, mas sua aplicabilidade tem sido limitada pela dificuldade de armazenamento. Os métodos disponíveis para armazenar hidrogênio em tanques na forma de hidrogênio líquido ou comprimido não são adequados para aplicações cotidianas. Duas razões principais são baixa densidade de energia e sérios problemas de segurança. Parece que o armazenamento em estado sólido em desenvolvimento é a abordagem definitiva para aproveitar os benefícios do hidrogênio. Existem vários métodos de armazenamento em estado sólido para o hidrogênio; apesar do crescente interesse, todos eles ainda estão muito aquém das expectativas práticas (embora, ocasionalmente, sejam utilizados). Para traçar uma estratégia, o Departamento de Energia dos Estados Unidos lançou um programa de hidrogênio e estabeleceu metas tangíveis para concretizar o hidrogênio em estado sólido. (Eftekhari & Fang, 2017. Tradução nossa)

É certo, pois, que o desenvolvimento adequado de tecnologia própria é um requisito para o hidrogênio garantir seu lugar na transição energética, tal como ocorre (e ocorreu) em qualquer tecnologia baseada em energia renovável (Kovač *et al.*, 2021).

Assim, diante da expectativa de cooperação global em torno do desenvolvimento inventivo para este segmento, alguns conceitos de propriedade intelectual precisam ser abordados para uma melhor compreensão destas perspectivas, dentre eles, o de transferência de tecnologia e patentes.

Entende-se por transferência de tecnologia o processo pelo qual ativos de propriedade intelectual, bem como conhecimentos, habilidades, técnicas, métodos ou tecnologias, são compartilhados e disseminados entre diferentes entidades, como organizações, empresas, países ou instituições de pesquisa.

A transferência de tecnologia (TT) é um processo colaborativo que permite que descobertas científicas, conhecimento e propriedade intelectual fluam dos criadores, como universidades e instituições de pesquisa, para usuários públicos e privados. Seu objetivo é transformar invenções e resultados científicos em novos produtos e serviços que beneficiem a sociedade. A transferência de tecnologia está intimamente relacionada à transferência de conhecimento. (World Intellectual Property Organization. Tradução nossa)

Trata-se, pois, de um fluxo de conhecimento técnico e científico de uma fonte para outra, com o objetivo de melhorar a capacidade produtiva, inovar, desenvolver produtos ou processos mais avançados e além de repercutir de forma direta em questões de desenvolvimento econômico e social.

A transferência de tecnologia pode ocorrer de várias maneiras, como por meio de acordos de licenciamento, cessão, parcerias estratégicas, colaborações de pesquisa e desenvolvimento, aquisição de tecnologia, assistência técnica, troca de informações e publicações científicas. Essa transferência pode envolver a transferência de conhecimento teórico, *know-how* prático, propriedade intelectual, patentes, direitos autorais ou segredos comerciais.

Segundo Di Blasi os contratos de transferência de tecnologia podem ser definidos tais como:

Acordos verbais ou expressos têm por objeto o desenvolvimento de inovações tecnológicas, a exploração temporária dos direitos da propriedade industrial ou outros bens jurídicos imateriais de natureza tecnológica, bem como o ensinamento de conhecimentos técnicos para terceiro. (DI BLASI, Gabriel. 2010)

Dentro deste ambiente, as tecnologias protegidas por patentes devem ter grande protagonismo no desenvolvimento do mercado de hidrogênio, pelo que se espera que suas explorações comerciais, em consequência da difusão de conhecimento, inclusive pela transferência de tecnologia em seu conceito amplo, impulsionem e viabilizem o crescimento do setor de hidrogênio.

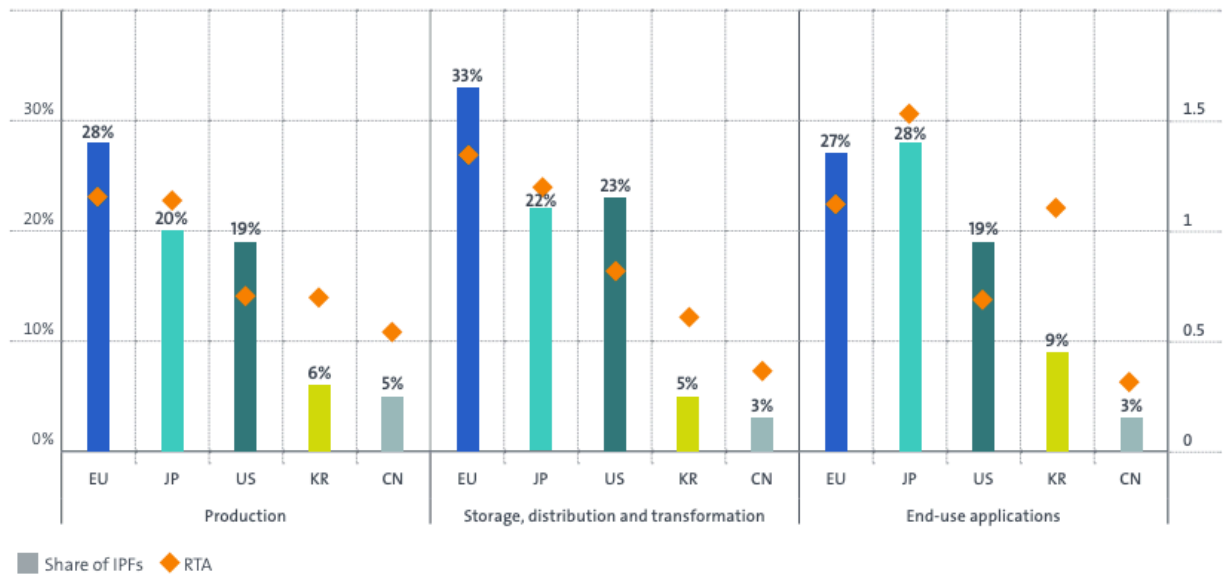
Nesse âmbito, o instituto da patente, por sua vez, confere ao autor de invenção ou modelo de utilidade a garantia de propriedade sobre seu produto.

A patente é um título de propriedade temporário, oficial, concedido pelo Estado, por força de lei, ao seu titular ou seus sucessores (pessoa física ou pessoa jurídica), que passam a possuir os direitos exclusivos sobre o bem, seja de um produto, de um processo de fabricação ou aperfeiçoamento de produtos e processos já existentes, objetos de sua patente. Terceiros podem explorar a patente somente com permissão do titular (mediante uma licença). (INPI. 2021)

No recorte das tecnologias associadas ao hidrogênio verde, considerando o período entre 2010 e 2020, verificou-se que a liderança global em patentes é detida por países da Europa e pelo Japão, seguida dos Estados Unidos. Na mesma rota, as invenções relacionadas ao hidrogênio proveniente da Coreia do Sul e da China têm começado a surgir em nível internacional (IEA, 2023).

ILUSTRAÇÃO 8 – Participação de patentes internacionais e tecnologias por região e cadeia produtiva

Share of international patenting and revealed technology advantage by main world regions and value chain segments (IPFs, 2011–2020)



Fonte: IEA 2023

Na perspectiva da necessidade de impulsionar o crescimento econômico, promover a competitividade e abordar conjuntamente os desafios globais ligados ao mercado de hidrogênio verde, o compartilhamento e transferência de tecnologia tem papel fundamental no progresso tecnológico e na difusão de inovações. Ao facilitar o compartilhamento de conhecimento e recursos, ajuda-se a reduzir a lacuna tecnológica entre países ou organizações, permitindo que eles aproveitem as tecnologias desenvolvidas por outros e as apliquem em seus próprios contextos.

3.3 O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO E O PAPEL DO GOVERNO

Não obstante a predominância do aproveitamento das águas para geração de eletricidade na matriz elétrica brasileira, o incentivo ao uso de fontes renováveis é verificado na legislação brasileira há décadas, inclusive pode ser verificado no texto constitucional, conforme ensina Campos (2010, p. 15):

Para incentivar a exploração de energia renovável de capacidade reduzida, a Constituição dispensa a atividade de qualquer autorização ou concessão, porém a Carta Magna não estabeleceu o quantum de potência, abaixo da qual um potencial de energia hidráulica pode ser definido como de capacidade reduzida, deixando que esse critério fosse fixado pelo legislador ordinário.

Em maior escala, tendo em vista que as atividades econômicas do setor elétrico brasileiro são reguladas pelo Estado, é essencial contextualizar a sua estrutura, considerando que o desenvolvimento do mercado de hidrogênio se dará dentro desta, através da edição de normas e diretrizes emanadas dos agentes públicos que possuem papel normativo e fiscalizador no âmbito do mercado elétrico brasileiro.

Nos anos de 2003 e 2004 o Governo Federal definiu as novas diretrizes do modelo do referido setor, tendo como marco basilar a publicação das Leis nº 10.847, de 15 de março de 2004, a qual autorizou a criação da Empresa de Pesquisa Energética, e 10.848, de mesma data, que dispõe, em linhas gerais, sobre a comercialização de energia elétrica, bem como do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, que regulamenta esta última norma.

Em contexto geral e sistêmico, a estrutura de governança do setor é atualmente composta por diversos agentes institucionais, os quais possuem atribuições específicas para a sua composição total, com destaque para o Ministério de Minas e Energias, a Agência Nacional de Energia Elétrica, a Empresa de Pesquisa Energética e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.

Segundo Tolmasquim (2011, p. 30-31), os agentes estão classificados em três níveis: agentes que executam atividades de governo, agentes que executam atividades regulatórias e agentes que executam atividades especiais.

O alinhamento do governo, em todos os seus níveis, para o desenvolvimento do mercado de hidrogênio é um dos pilares decisivos para o sucesso deste setor. Além, da regulamentação e desenvolvimento de padrões, há necessidade de incentivos governamentais e isenções para a comercialização de novas tecnologias,

uma das principais frentes relacionadas ao mercado ora referido (Clark & Rifkin, 2006).

Nesta conjuntura, em dezembro de 2020, foi aprovado pelo Ministério de Minas e Energias o Plano Nacional de Energia 2050. O referido documento se trata de um conjunto de recomendações e diretrizes elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética, a serem seguidas até o ano de 2050.

No referido documento, o hidrogênio é referido como um dos pilares para o processo de transição energética, alinhando-se com as estratégias do Governo para o incremento econômico e social do país.

É importante registrar o papel da Economia do Hidrogênio na transição energética, pois muitas das fontes renováveis de energia elétrica são intermitentes e diversos setores de consumo dificilmente serão atendidos por eletricidade ou biocombustíveis. Dentre as alternativas para produção de hidrogênio, a rota verde (de eletrólise da água a partir de fontes renováveis de eletricidade) é considerada como a de maior relevância internacional e o Brasil é reconhecido, mundialmente, como um potencial grande player nesse novo energético. (Brasil. Plano Nacional de Energia 2050)

Verifica-se, assim, que o Governo brasileiro reconhece o potencial do hidrogênio como importante elemento dentro das políticas energéticas, pelo que se espera um incremento contínuo das ferramentas regulatórias e incentivos para promover e impulsionar a transição energética no país.

3.4 ASPECTOS LEGAIS

A regulação da atividade de produção de hidrogênio verde no Brasil vem sendo estruturada no âmbito do Programa Nacional do Hidrogênio, conduzido pelo Ministério de Minas e Energia, o qual teve lançadas em 2021, estabelecendo-se, dentre outros pontos, os seus eixos de desenvolvimento.



Fonte: Ministério de Minas e Energias 2021

Note-se, pois, que um dos eixos relacionados se refere ao arcabouço legal e regulatório-normativo, para o qual a proposta do Governo determinou o desenvolvimento das seguintes iniciativas:

- a. Mapear as competências existentes das agências reguladoras, órgãos ou entidades competentes, bem como novas necessidades;
- b. Avaliar a necessidade de proposição de normativos sobre novas tecnologias nos três níveis (federal, estadual e municipal);
- c. Observar que a regulação se mantenha aberta às condições de mercado e evitando barreiras e trancamentos tecnológicos;
- d. Avaliar interrelações entre setores e propor harmonizações;
- e. Buscar desenvolver e estabelecer códigos, normas e padrões expedidos pelas instituições nacionais em consonância com regras internacionais;
- f. Promover a cooperação entre agências governamentais para a regulação do hidrogênio, considerando suas múltiplas fontes e utilizações, buscando a harmonização regulatória, citando-se como exemplo o transporte do hidrogênio misturado ao gás natural;
- g. Avaliar a necessidade de proposição de normas adicionais relativas à segurança, para produção, transporte e utilização do hidrogênio; e
- h. Avaliar a necessidade de desenvolver mecanismos de certificação de hidrogênio, para produção e consumo.

(Programa Nacional de Hidrogênio. Proposta de Diretrizes. Julho 2021)

No mesmo ano, foram lançadas as Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio (Ministério de Minas e Energias. 2021), apresentando os aspectos conceituais fundamentais para a modelação da estratégia brasileira de hidrogênio.

Em tal documento, foram avaliados, tecnicamente, os seguintes temas: panorama do mercado de hidrogênio; rotas tecnológicas e processos de geração de hidrogênio; custos e aspectos competitivos do hidrogênio; desafios para desenvolvimento do mercado de uso energético do hidrogênio; papel do hidrogênio na transição energética; e considerações finais e implicações de políticas públicas.

Neste sentido, sob a perspectiva legal, o arcabouço jurídico para o mercado de hidrogênio verde no Brasil é bastante incipiente, de modo que o desenvolvimento deste trabalho está limitado ao disposto na legislação nacional atualmente vigente para plantas desta natureza.

Neste cenário, é importante reforçar que atualmente existem diversos desafios tecnológicos para viabilizar o armazenamento e transporte do hidrogênio em seu estado puro, de modo que, via de regra, a produção do composto tem sido feita utilizando a amônia como veículo de viabilização logística.

Para viabilizar o transporte eficiente de hidrogênio em longas distâncias em grande escala, o armazenamento de hidrogênio utilizando a forma líquida de hidretos químicos tem sido amplamente explorado devido às altas capacidades volumétricas de armazenamento de H₂ (30-60 g L⁻¹, base do material), além da facilidade de armazenamento e transporte utilizando infraestrutura bem estabelecida de combustíveis fósseis. Entre muitos hidretos químicos, como metanol, ácido fórmico e transportadores líquidos de hidrogênio orgânicos (por exemplo, metilciclohexano, 12H-N-etilcarbazol, 18H-dibenziltolueno), a amônia é uma excelente candidata inorgânica para transporte de hidrogênio por meio de armazenamento químico de hidrogênio. (Cha *et al.*, 2021. Tradução nossa)

Este ponto tem reflexo direto no enquadramento legal das atividades deste setor, tendo em vista que as plantas de produção de amônia, bem como de gases industriais, já dispõem de regras específicas, que têm sido aplicadas para suprir as lacunas legais atualmente existentes.

Para a análise legal, serão considerados os aspectos regulatórios para empreendimentos desta natureza. Ademais, tendo em vista que parte dos aspectos abordados estão sujeitos à jurisdição legislativa de competência estadual e municipal, abordaremos o tema considerando o Estado do Ceará, Município de Caucaia.

Por fim, para o recorte da análise definida, não serão avaliadas eventuais interferências, ainda que indiretas ou parciais, em áreas indígenas, quilombolas, unidades de conservação ou com qualquer outro tipo de limitação legal em perspectiva fundiária.

3.5 CERTIFICAÇÃO

Tendo em vista que o enquadramento do hidrogênio na categoria verde requer a verificação conjunta de diversos critérios ao longo da sua cadeia produtiva, um dos desafios encontrados pelo mercado é a definição universal dos padrões a serem rastreados para confirmação da procedência do produto.

Neste sentido, algumas certificações vêm sendo criadas para ajudar neste controle, a fim de assegurar que o hidrogênio produzido atenda a determinados critérios e padrões estabelecidos. Assim, apesar da inexistência de um sistema de certificação universalmente adotado, algumas diretrizes e esquemas de verificação estão em desenvolvimento para promover a transparência e a confiabilidade do hidrogênio verde.

Portanto, é necessário estabelecer e aprimorar o sistema internacional de padrões de qualidade do hidrogênio, levando em consideração o cálculo de emissões de carbono, a compatibilidade transfronteiriça e o reconhecimento mútuo. As iniciativas para desenvolver o hidrogênio verde podem ser encontradas principalmente na Europa, como mostrado na Tabela 1. Fatores-chave foram investigados por agências de padronização internacionais (por exemplo, CEN CLC JTC 6) e organismos de certificação, incluindo os resultados de determinados projetos e projetos em consulta nas áreas de energia e política climática (por exemplo, EU CertifHy, AFHYPAC e os governos da Califórnia e Reino Unido. (Liu *et al.*, 2022. Tradução nossa)

Tal processo geralmente envolve aspectos relacionados à forma como o composto é produzido, sua origem renovável e a minimização das emissões de gases de efeito estufa ao longo do seu ciclo de vida. Os critérios comuns que podem ser considerados durante o processo de certificação incluem:

- a. Origem renovável: confirmação de que a energia utilizada na produção do hidrogênio é proveniente de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidrelétrica.
- b. Emissões de carbono: verificação e controle das emissões de gases de efeito estufa ao longo do processo de produção do hidrogênio, desde a geração de energia até a eletrólise da água.
- c. Rastreabilidade: definição de mecanismos para rastrear a origem e a cadeia de suprimentos do hidrogênio, garantindo a transparência e a integridade do produto.
- d. Padrões de qualidade: confirmação da qualidade do hidrogênio em termos de pureza, composição química e outros parâmetros relevantes.
- e. Auditoria e monitoramento: manutenção de auditorias independentes e monitoramento regular para garantir a conformidade contínua com os

critérios de certificação.

Importante destacar que a falta de um padrão formal para o hidrogênio verde reflete a disparidade de interpretações encontradas na literatura. Algumas das principais iniciativas de caracterização do hidrogênio verde encontradas em todo o mundo são descritas tabela abaixo e incluem o trabalho preliminar realizado por agências de padronização, organismos de certificação, bem como o resultado de projetos e processos de consulta na área de política energética e climática (Velazquez Abad & Dodds, 2020).

ILUSTRAÇÃO 10 – Requisitos de qualificação do hidrogênio verde em âmbito global

Green hydrogen characterisation initiatives worldwide.

Body (Country)	Type	Main Policy Objective	Baseline GHG threshold	Qualification level	Qualifying processes	System boundary
AFHYPA ^a (France)	GO scheme (working group proposal)	Renewable energy source	None	Must be 100% renewable	Any renewable pathway, including electrolysis powered by waste (with renewable electricity or biomethane GO).	Point of production
BEIS ^b (UK)	Standard Consultation (abandoned)	Reduction of CO ₂ emissions	Never determined	To be determined. A single threshold differentiated according to end use (e.g. transport)	Any (technology neutral)	Point of production
California Low Carbon Fuel Standard	Regulation (active)	Reduction of air quality and CO ₂ emissions. Third of vehicle hydrogen produced from renewable energy.	WTW emissions from new gasoline vehicles	30% lower GHG and 50% lower NO _x emissions (on WTW per mile basis) for fuel cell electric vehicles	Renewable electrolysis, catalytic cracking of SMR of biomethane or thermochemical conversion of biomass, including MSW.	Point of use
CEN/CENELEC CLS JCT 6 WG1/WG2 (International)	International Standard (in preparation)	Terminology, GO, interfaces, operational management, safety, training and education	Adopted from CertifHy	Adopted from CertifHy	Adopted from CertifHy	Adopted from CertifHy
CERTIFHY (EU wide)	GO scheme (testing)	Renewable energy source/ GHG emissions	Hydrogen produced via SMR of natural gas	At least 60% lower than SMR ^c (this is ≤ 36.4 gCO ₂ e/MJ H ₂ for the past 12 months)	Any renewable pathway meeting the threshold with 99.5% purity	Point of production
TÜV SÜD (Germany)	National Standard (active)	Reduction of CO ₂ emissions	Hydrogen from SMR of natural gas	35–75% emissions reduction below baseline (83.8–89.7 gCO ₂ e/MJ), depending on production process, and time phase	Renewable electrolysis; biomethane SMR; pyro-reforming of glycerine	Point of use

^a L' Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible.

^b BEIS Green Hydrogen Standard was a consultation process that did not result in an official standard.

^c The baseline carbon intensity considered by CertifHy for SMR is 91 gCO₂e/MJ H₂.

Fonte: A. Velazquez Abad. Energy Policy 138. 2020.

O controle desta certificação é feito, nacionalmente, pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE, que lançou, em 2022, o Manual de Certificação do Hidrogênio. O documento foi elaborado com base em padrões europeus, dada a necessidade de uniformidade dos parâmetros em virtude do interesse brasileiro de exportar o composto, devendo, pois, atender as mesmas especificações dos mercados estrangeiros.

3.5.1 Rastreabilidade da energia elétrica utilizada no processo produtivo

Inicialmente, importante elucidar que, nos termos da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, regulada pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, o mercado

energético brasileiro se divide em dois ambientes de contratação, os quais estão diretamente conectados ao potencial de consumo dos destinatários finais: um ambiente regulado, dos quais fazem parte os consumidores cativos, e o ambiente livre, com consumidores livres.

Nos termos dos referidos dispositivos legais, são consumidores cativos aqueles que não tem a faculdade de eleger o seu fornecedor, adquirindo eletricidade da empresa de distribuição concessionária da sua região, o que ocorre dentro do chamado Ambiente de Contratação Regulado.

Por outro lado, existem consumidores autorizados a escolher seus fornecedores de energia elétrica, chamados de consumidores livres, que podem negociar livremente com os agentes geradores, escolhendo a fonte de geração, preços e condições, formando, assim, o Ambiente de Contratação Livre.

A aquisição de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulado apresenta diversas limitações, uma vez que somente é feita pelas concessionárias do serviço de distribuição, por meio de certame licitatório, em modalidade de leilão, realizada diretamente pelos órgãos vinculados ao Poder Público. Este ambiente tem como objetivo a redução dos custos para os consumidores finais, através dos quais os geradores, individualmente, celebram contrato de venda de energia com todas as concessionárias reunidas em pool.

No ambiente regulado, o critério utilizado no certame é o da menor tarifa, ou seja, vencem os agentes de geração que ofertarem o montante necessário para as concessionárias de distribuição pelo menor valor de megawatt hora.

Ao final, toda a energia adquirida neste formato é lançada no Sistema Interligado Nacional – SIN, composto pela malha de transmissão energética dentro do país. Em outras palavras, este sistema é responsável por suportar e distribuir toda a energia gerada em praticamente todo o Brasil, independente da sua fonte, o que inviabiliza o rastreio das matrizes utilizadas em sua geração.

Diante de tal limitação, as indústrias produtoras de hidrogênio verde deverão adquirir sua energia no chamado ambiente livre Ambiente de Contratação Livre (ACL), negociando exclusivamente com agentes geradores de matriz limpa, de modo a lastrear seu consumo com utilização exclusiva de fontes eólicas ou solares.

Representando aproximadamente 34% do consumo de energia no Brasil, de acordo com dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica divulgados em 2023 (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2022), o Ambiente de

Contratação Livre é aquele que permite a celebração de contratos bilaterais livremente ajustados entre consumidores e vendedores de energia elétrica.

O enquadramento dos consumidores na modalidade livre se dá, especialmente, pelo seu volume de consumo, tal como disposto na Portaria do Ministério de Minas e Energias nº 514, de 27 de dezembro de 2018, viabilizando a escolha do agente gerador pelo consumidor, condição essencial para a indústria de produção de hidrogênio verde.

Importante destacar, ainda, que consumidores livres podem utilizar o Sistema Interligado Nacional, desde que arquem com alguns custos envolvidos. Em outras palavras, o consumidor livre utilizará a energia disponível no sistema, contudo, deverá comprovar que contratou a totalidade da sua de geradores que utilizem fontes renováveis.

Trata-se, pois, de um processo de contabilização, em que o produtor de hidrogênio verde deverá atestar que todo seu consumo, retirado do SIN, teve a correspondente geração contratada com plantas de matriz renovável.

3.6 INSERÇÃO DO ESTADO DO CEARÁ NO MERCADO DE HIDROGÊNIO

Em recorte regional, o Ceará detém reconhecido protagonismo na atração de investimentos estrangeiros na área de energias renováveis, o que se alinha às novas promessas para o mercado de hidrogênio, em especial à perspectiva de implantação de usinas *offshore*.

Como ponto de destaque, as características geográficas e climatológicas do Estado se apresentam como forte vantagem competitiva, tendo em vista a necessidade de complementariedade de geração, solar e eólica, para operação dos eletrolisadores utilizados no processo de produção do hidrogênio.

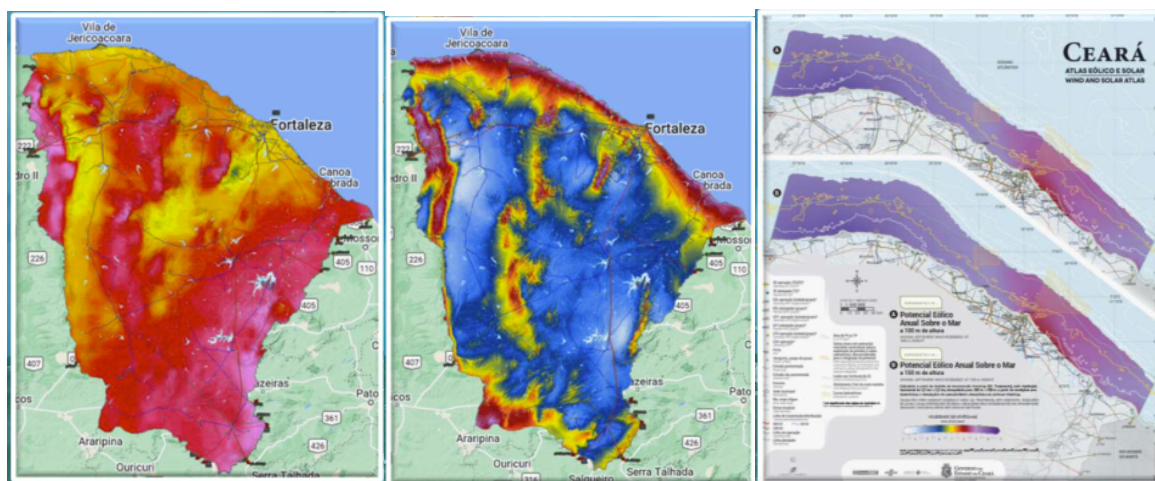
A geração de energia fotovoltaica e eólica ocorre em vários ciclos de tempo e apresenta faixas de flutuação de potência de saída. Com essas características, a operação do eletrólito sofre vários problemas. Por exemplo, a flutuação de energia causa degradação do eletrodo devido a mudanças repentinas no potencial do eletrodo. Em particular, grandes mudanças de potencial são causadas pela corrente reversa gerada quando a operação é interrompida, o que degrada significativamente o desempenho do eletrodo do eletrólito. (Kojima *et al.*, 2023. Tradução nossa)

Neste sentido, destaca-se o Atlas Solar e Eólico do Estado do Ceará, resultado de um convênio celebrado em 2018 entre o Governo do Estado, Agência de Desenvolvimento do Ceará (ADECE), a Federação das Indústrias do Estado do Ceará

(FIEC) e o Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE). Trata-se de um levantamento realizado para mapear os potenciais energéticos do estado, publicamente disponibilizado para o mercado e sociedade, visando subsidiar o fomento da cadeia produtiva das energias renováveis e viabilizar o aumento na atração de investimentos (Ceará. 2019).

No âmbito do desenvolvimento do mercado de hidrogênio, o atlas tem relevância para a concepção dos projetos nesta área, tendo em vista que a energia proveniente de fonte renovável é insumo essencial para as plantas de produção do composto. Assim, a disponibilização dos dados facilita uma importante etapa de modelagem dos negócios nesse setor, que já conta com análises robustas dos potenciais de produção eólica e solar na região, tal como indica a Ilustração 11.

ILUSTRAÇÃO 11 – Mapa de Recursos Solares e Eólicos



Fonte: Atlas Solar e Eólico do Estado do Ceará, 2019.

Ademais, o Estado conta com uma Zona de Processamento para Exportação, fundada em 2010, integrada ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no qual se encontram instaladas diversas empresas ligadas à cadeia operacional das indústrias de energia, o que inclui, além de plantas de geração, fabricantes de componentes de aerogeradores, dentre outras.

Neste cenário, e identificando um ecossistema de negócios favorável, o Governo do Estado vem empenhando esforços para firmar memorandos de entendimento com investidores para implantação de unidades produtoras de hidrogênio – a grande maioria com intenção de se instalar na ZPE do Complexo Industrial e Portuário do Pecém – como parte da estratégia de tornar o Ceará o

principal produtor de energia renovável do país e, conseqüentemente, um dos principais do mundo na produção de hidrogênio verde para exportação e também consumo local.

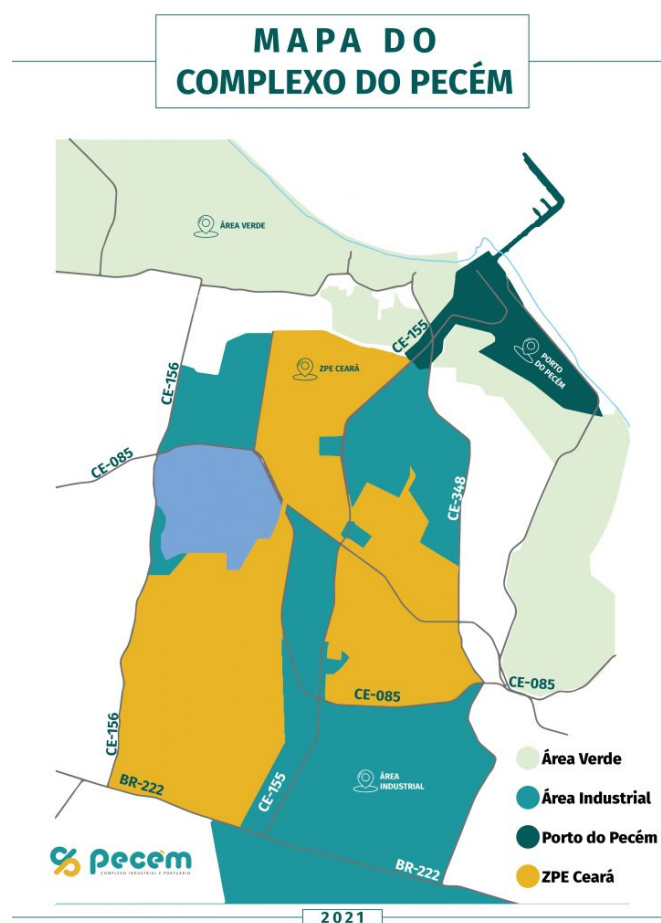
3.6.1 Diferenciais competitivos do Estado do Ceará

O regime aduaneiro especial das Zonas de Processamento de Exportação (ZPEs) foi estabelecido em 1988, através da Lei nº 96.758, permitindo a criação de áreas de livre comércio com o exterior, destinadas a empresas industriais que tenham com atividade a produção de bens e serviços voltadas para o mercado estrangeiro. Essas zonas são consideradas áreas primárias para efeito de controle aduaneiro e desfrutam de tratamentos tributários, cambiais e administrativos específicos.

Com o amadurecimento do mercado brasileiro, foi editado um novo Marco legal das ZPEs, implementado em 2021 através da Lei nº 14.184, o qual colocou em linha as necessidades e demandas econômicas e mercadológicas atuais, com vistas à atração de investimentos e expansão das exportações brasileiras. Essa nova regulamentação foi um passo importante para fortalecer a integração internacional do país, viabilizando a atração de capital estrangeiro para produzir e exportar.

As novas regras trazem mudanças significativas para o ambiente de negócio fomentado pelas ZPEs, dentre as quais, destaca-se a flexibilização do mercado fim das empresas instaladas nessas áreas, as quais não são mais obrigadas a exportar 80% de sua produção, tal como estabelecido na legislação anterior, o que permite uma maior diversificação de modelos de negócio e setores beneficiados.

Neste cenário, o Estado do Ceará, que historicamente se destaca pela atração de investimentos estrangeiros em energias renováveis, possui uma ZPE fundada em 2010, integrada ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no qual estão instaladas várias empresas relacionadas à indústria de energia, incluindo fabricantes de componentes de aerogeradores dentre outras companhias integrantes da cadeia operacional.



Fonte: ZPE Ceará, 2023.

A Zona de Processamento de Exportação do Ceará dispõe de uma área de 6.182 hectares destinada à implantação de empreendimentos, já tendo registrado movimento de mais de 61 milhões de toneladas de cargas ao longo de sua história (ZPE, 2023).

A localização da ZPE é estratégica, pois sua Área de Despacho Aduaneiro (ADA) está a apenas 6 km de distância do Porto do Pecém, a menos de 60 km da capital Fortaleza e a cerca de 56 km do Aeroporto Internacional de Fortaleza (ZPE, 2023). Essa proximidade com importantes vias de transporte marítimo e aéreo facilita o fluxo de mercadorias e agiliza a logística, incrementando o seu potencial na atração de investimentos e viabilização de operações comerciais.

Compondo este ambiente favorável, destaque-se que o Ceará tem a maior parte da sua energia elétrica gerada a partir de fontes renováveis. Segundo dados da ANEEL, levantados em junho de 2023, o estado possui 539 plantas de geração solares e eólicas, representando mais de 60% da sua matriz energética (ANEEL, 2023).

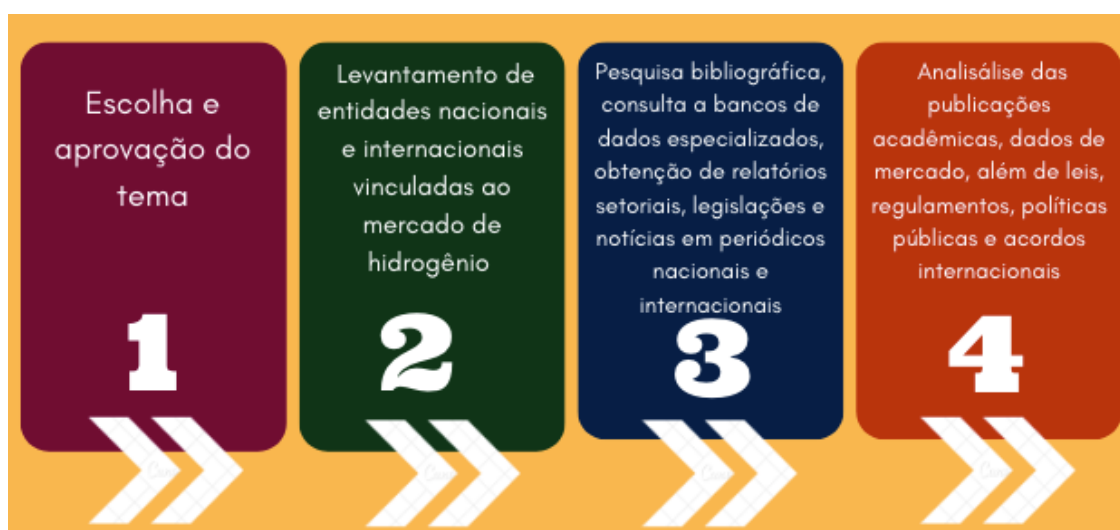
Levando em conta esse cenário favorável para os negócios, o Governo do Estado está se esforçando para estabelecer acordos com investidores para implantar unidades produtoras de hidrogênio. A maioria dessas unidades tem a intenção de se instalar na ZPE do Complexo Industrial e Portuário do Pecém. Essa iniciativa faz parte da estratégia de tornar o Ceará referência na produção de energia renovável do país e, conseqüentemente, um dos principais produtores de hidrogênio verde do mercado, tanto para exportação quanto para consumo local.

4. METODOLOGIA

4.1 FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

A metodologia utilizada no presente estudo, descrita em detalhes nos tópicos seguintes, está graficamente representada no fluxograma da Ilustração 13.

ILUSTRAÇÃO 13 – Fluxograma metodológico



Fonte: Próprio autor.

4.1 MÉTODOS INICIAIS

Após a escolha e aprovação do tema proposto, procedeu-se com o levantamento de entidades nacionais e internacionais do mercado de hidrogênio, pesquisa de publicações acadêmicas nacionais e estrangeiras sobre o hidrogênio verde, os desafios da transição energética e outros temas correlatos, além da análise da legislação nacional e estrangeira.

O presente estudo adotou uma abordagem de pesquisa bibliográfica e documental, de natureza qualitativa e exploratória, com foco na área de hidrogênio. A pesquisa bibliográfica consistiu em realizar uma extensa revisão da literatura disponível, incluindo livros, artigos científicos e relatórios técnicos.

4.2 ABORDAGEM

Utilizou-se a abordagem qualitativa para os aspectos transversais e multidisciplinares envolvidos na produção e utilização do hidrogênio como fonte de energia limpa. Por meio da análise qualitativa dos dados coletados, foi possível

identificar tendências e perspectivas em curso.

4.3 COLETA DE DADOS

Foi realizado levantamento das principais entidades nacionais e estrangeiras envolvidas nesse setor. Por meio de pesquisa bibliográfica, consulta a bancos de dados especializados e análise de relatórios setoriais, foram identificadas organizações de renome que atuam na coleta e produção de dados relacionados ao hidrogênio. Essa etapa permitiu a identificação dos principais atores do mercado, fornecendo uma base sólida para a análise dos desafios e oportunidades relacionados ao hidrogênio.

Com o objetivo de embasar teoricamente a pesquisa, foram realizadas buscas em publicações acadêmicas nacionais e estrangeiras relacionadas ao hidrogênio verde, bem como aos desafios da transição energética e temas correlatos. Utilizando bases de dados especializadas, como bibliotecas virtuais de universidades, repositórios de artigos científicos e periódicos indexados, buscamos por estudos recentes, teses, dissertações e artigos que abordassem aspectos jurídicos, técnicos, econômicos, ambientais e sociais relacionados ao uso do hidrogênio como fonte de energia limpa.

4.4 ANÁLISE DOS DADOS

Foram analisadas as publicações acadêmicas, dados de mercado, além de leis, regulamentos, políticas públicas e acordos internacionais que tratam diretamente da utilização e uso do hidrogênio como vetor estratégico na transição energética da comunidade internacional.

A análise dos instrumentos legais viabilizou compreensão das diretrizes governamentais, das metas de redução de emissões de carbono e de outros aspectos regulatórios relevantes para o desenvolvimento e a implementação de projetos relacionados ao hidrogênio verde.

Ao adotar essa abordagem metodológica, buscou-se construir uma base sólida de conhecimento para lastrear a análise crítica e a contribuição original desta pesquisa.

5. RESULTADOS

Os resultados deste estudo trouxeram um mapeamento das perspectivas do hidrogênio verde como uma fonte de energia sustentável e seu potencial para impulsionar a transição energética global. Foram examinados os avanços tecnológicos, as perspectivas econômicas, os desafios ambientais e as oportunidades socioeconômicas associadas ao uso do hidrogênio verde. Além disso, identificou-se as aplicações do hidrogênio verde em setores como transporte, indústria e armazenamento de energia, bem como os impactos potenciais dessas aplicações na redução das emissões de gases de efeito estufa e na mitigação das mudanças climáticas.

Foram gerados, ademais, resultados referentes ao desenvolvimento dos mercados nacionais e estrangeiros de hidrogênio verde, através da sequência do levantamento das iniciativas e dos projetos em andamento em diferentes países, bem como da análise comparativa das políticas públicas, incentivos e estratégias adotadas para promover o uso do hidrogênio como fonte de energia limpa. Além disso, investigou-se os principais atores envolvidos no mercado de hidrogênio, como empresas, instituições de pesquisa e organismos governamentais, visando entender suas contribuições e identificar oportunidades de colaboração.

Um aspecto crucial para o desenvolvimento do setor de hidrogênio verde é a existência de normas e regulamentos que garantam a segurança, a eficiência e a interoperabilidade dos sistemas e tecnologias relacionados ao hidrogênio. Assim, apresentam-se resultados referentes às normas já em vigor e as que estão em preparação em nível nacional e internacional. Realizou-se uma análise das principais diretrizes técnicas e regulatórias que orientam a produção, o armazenamento, o transporte e o uso do hidrogênio verde, bem como as tendências e desafios associados à harmonização dessas normas em diferentes jurisdições.

Por fim, este estudo abordou o alinhamento estratégico do governo federal e estadual no Ceará para o desenvolvimento do setor de hidrogênio, pelo que foram analisadas as políticas públicas, os incentivos fiscais, os programas de pesquisa e desenvolvimento, bem como as parcerias público-privadas estabelecidas para promover a produção, o uso e a comercialização do hidrogênio verde no estado.

5.1 INICIATIVAS RELACIONADAS AO DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE HIDROGÊNIO VERDE

Dentre os resultados obtidos, verificou-se que a identificação e catalogação das iniciativas a nível nacional e internacional relacionadas ao desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde são essenciais para a compreensão do panorama global desta indústria, e avaliação dos seus efeitos e repercussões no contexto brasileiro.

Foi realizado amplo levantamento de informações sobre as entidades, projetos e programas em andamento ao redor do mundo, o que incluiu governos, empresas, instituições de pesquisa e organizações não governamentais, evidenciando-se o apelo agregador desta pauta e a sinergia dos seus agentes no desempenho de papéis específicos para o desenvolvimento deste setor.

Em nível internacional, diversas organizações têm trabalhado promoção e coordenação dessas iniciativas, das quais o Brasil compõe algumas como membro, tal como apresentado na Ilustração 14.

ILUSTRAÇÃO 14 – Iniciativas de promoção do hidrogênio e participação brasileira

INICIATIVA OU PROOGRAMA	COORDENAÇÃO OU IDEALIZAÇÃO	PARTICIPAÇÃO BRASILEIRA
<i>Clean Energy Ministerial Hydrogen Initiative</i>	<i>International Energy Agency (IEA)</i>	Sim
<i>International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy</i>	Departamento de Energia dos EUA e Departamento de Transporte dos EUA	Sim
<i>Mission Innovation Clean Hydrogen Mission</i>	Iniciativa conjunta dos países membros	Sim
<i>IEA Hydrogen Technology Collaboration Programme</i>	<i>International Energy Agency (IEA)</i>	Não

Fonte: Próprio autor. (2023)

Verificou-se que, em linhas gerais, as parcerias e alianças tem como objetivo facilitar o intercâmbio de conhecimentos, promover a colaboração em pesquisa e desenvolvimento, e apoiar a implementação de projetos entre os participantes.

A Iniciativa Ministerial de Hidrogênio para Energia Limpa (*Clean Energy Ministerial Hydrogen Initiative*), lançada em 2019 pela Agência Internacional de

Energia (AIE), em Vancouver, Canadá, reflete uma coalizão multigovernamental que visa promover políticas, programas e projetos que acelerem a comercialização e implantação de tecnologias de hidrogênio e células de combustível em todos os aspectos da economia.

Constatou-se, ademais, um direcionamento governamental dos países para o estabelecimento das suas próprias estratégias e metas relacionadas ao hidrogênio verde. A União Europeia, por exemplo, lançou sua Aliança para o Hidrogênio Limpo (*Clean Hydrogen Partnership*), com o objetivo de impulsionar a produção, distribuição e utilização do hidrogênio verde em toda a Europa (União Européia, 2022).

Outros países como Austrália, Índia, Canadá, China, Rússia, Estados Unidos da América, Coreia do Sul, República da África do Sul, Japão e países do norte da África também têm implementado políticas e programas para incentivar o desenvolvimento desse mercado (Panchenko *et al.*, 2023).

No recorte brasileiro, o Governo Federal igualmente adere a esta corrente, reconhecendo a importância do hidrogênio na transição energética no desenvolvimento do mercado e economia do país, pelo que tem implementado programas e iniciativas para promover seu fomento, com destaque especial para o Plano Nacional de Energia 2050 e o Programa Nacional do Hidrogênio.

No âmbito da iniciativa privada, grandes corporações estão investindo em projetos de hidrogênio verde e formando parcerias estratégicas para impulsionar a cadeia de valor dessa indústria. Empresas do setor de energia, como produtoras de eletricidade renovável e distribuidoras de gás, estão explorando oportunidades para integrar a produção de hidrogênio verde em suas operações (IEA, 2019).

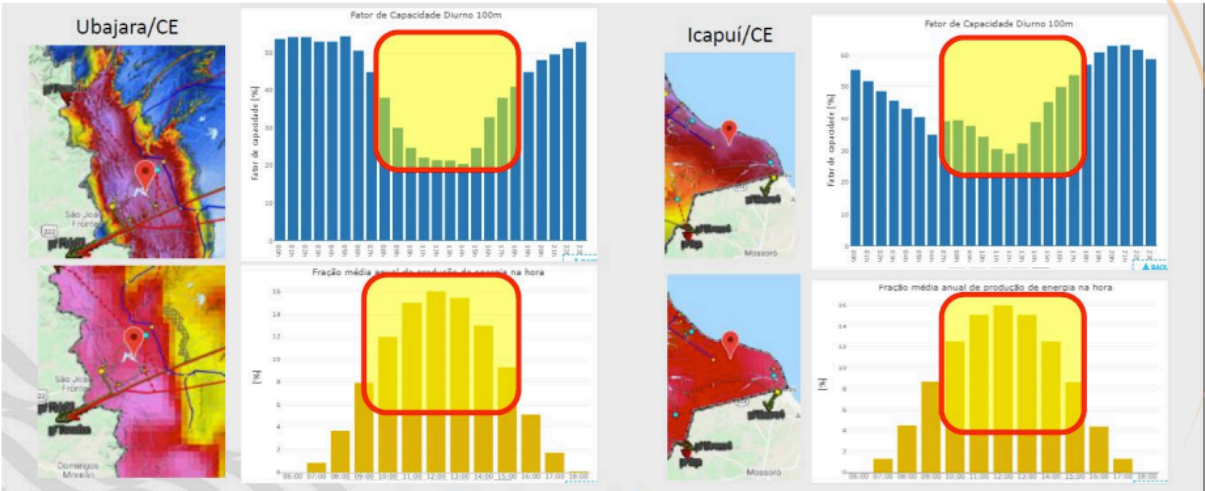
A identificação e análise dessas iniciativas a nível internacional permitem não apenas acompanhar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde, mas também identificar oportunidades de cooperação e sinergias entre diferentes países e organizações, os quais tem reflexo direto no ambiente brasileiro, contribuindo para a o compartilhamento de conhecimento e refinamento das melhores práticas do mercado.

5.1.1 Perspectivas para o Estado do Ceará

Em análise das perspectivas do Estado do Ceará, identificaram-se vantagens competitivas que podem torná-lo um importante *player* deste setor, com potencial de destaque em nível mundial.

Ressalte-se o grande potencial do estado para geração de energia a partir de fonte renovável, um dos principais insumos para a cadeia produtiva do hidrogênio verde. Sua condição climatológica, sobretudo solar e anemométrica, favorecem as indústrias eólica e solar, tendo em vista a complementaridade de recursos para geração simultânea, tal como demonstra a Ilustração 15.

ILUSTRAÇÃO 15 – Complementaridade de geração eólica e solar



Fonte: UFC, 2021.

No mesmo sentido, o estado já possui uma infraestrutura consolidada para a geração de energia eólica e solar, com 539 empreendimentos catalogados como demonstra a Ilustração 16, criada com base em dados coletados junto à ANEEL em junho de 2023.

ILUSTRAÇÃO 16 – Empreendimentos eólicos e solares no Ceará

FONTE	QUANTIDADE DE EMPREENDIMENTOS	REPRESENTAÇÃO % GERAÇÃO TOTAL DO ESTADO
Eólica	172	47,76%
Solar	367	14,01%

Fonte: Próprio autor.

Além dos atributos do clima, importante ressaltar que o estado está localizado em uma posição geográfica favorável para exportação, com acesso a rotas marítimas internacionais, facilitando o transporte e a distribuição do hidrogênio verde para outros mercados, aumentando a competitividade na exportação, como indicado na Ilustração 17.

ILUSTRAÇÃO 17 – Localização estratégica do Estado do Ceará



Fonte: Governo do Estado do Ceará. 2023.

Tal como demonstrado na Ilustração 17, o tempo de deslocamento marítimo entre o Ceará e a Europa, principal mercado alvo para a venda de hidrogênio, fica em torno de 7 a 11 dias. Ademais, a conexão com a América do Norte se dá em 8 dias de navegação. A posição geográfica se apresenta, assim, como importante vantagem competitiva para a região, considerando a cadeia logística de suprimento e exportação do produto.

Compondo este ecossistema, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no localizado no município de São Gonçalo do Amarante, a cerca de 60 km de Fortaleza, se apresenta como importante equipamento para o desenvolvimento de atividades industriais estratégicas, incluindo siderurgia, refino de petróleo, petroquímica e de geração de energia elétrica.

O Complexo do Pecém, detido por uma empresa de titularidade do Governo do Estado do Ceará e do Porto de Roterdã, na Holanda, é responsável pela gestão do complexo industrial e portuário localizado no litoral oeste do Ceará, com área extensa de mais de 19 mil hectares, que abriga algumas das principais instalações de produção do nordeste brasileiro.

ILUSTRAÇÃO 18 – Dados do Porto do Pecém

Fonte: Governo do Estado do Ceará. 2023.



Nesta mesma perspectiva, a presença da ZPE do Complexo Industrial e Portuário do Pecém oferece benefícios fiscais e aduaneiros para as empresas instaladas na região, além da infraestrutura portuária, que se diferenciam para atração de investimentos na produção de hidrogênio verde.

ILUSTRAÇÃO 19 – Porto do Pecém – Ceará



Fonte: Complexo Industrial e Portuário do Pecém. 2023.

Dentre as vantagens estabelecidas pela Lei nº 11.508, de 20 de julho de 2007, as empresas estabelecidas em ZPE desfrutam de uma série de benefícios significativos relacionados à aquisição de bens, insumos e serviços tanto do mercado

nacional quanto do mercado externo. No âmbito nacional, essas empresas usufruem da suspensão de impostos como o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) e o Programa de Integração Social/Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PIS/PASEP).

Adicionalmente, o mesmo dispositivo legal dispõe que, em relação às aquisições provenientes do mercado externo, as empresas na ZPE são beneficiadas com a suspensão de impostos como o Imposto de Importação (II), o Adicional ao Frete para Renovação da Marinha Mercante (AFRMM), além do IPI, COFINS de Importação e PIS/PASEP de Importação.

Considerando a legislação local aplicável, o Decreto Estadual 33.251/2019 estabelece a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) para bens e mercadorias destinados à utilização na cadeia de industrialização de produtos a serem posteriormente exportados. Além disso, a prestação de serviços de transporte intermunicipal e interestadual também se beneficia dessa isenção. Ademais, ressalte-se o diferencial de alíquotas nas aquisições interestaduais de bens destinados ao ativo imobilizado das empresas instaladas no perímetro da ZPE do Ceará.

Esses incentivos proporcionam um ambiente favorável para a aquisição e contratação de recursos e materiais necessários à produção, fortalecendo a competitividade e a capacidade exportadora das empresas instaladas nessas zonas especiais.

Assim, ratificando sua vanguarda no setor de energias renováveis, temos que a primeira molécula de hidrogênio verde produzida no Brasil teve sua fabricação no Estado do Ceará, em projeto piloto da empresa EDP Brasil, desenvolvida no Complexo Termelétrico do Pecém (UTE Pecém), no Município de São Gonçalo do Amarante ¹.

Essa série de fatos e vantagens competitivas posicionam o Ceará como um ambiente propício para se tornar um relevante produtor de hidrogênio verde, sobretudo para mercados estrangeiros, com grandes perspectivas de protagonismo a nível mundial neste setor.

¹ <https://www.ceara.gov.br/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-produzida-no-brasil-e-lancada-no-ceara/>

5.2 DIRETRIZES REGULATÓRIAS NO BRASIL

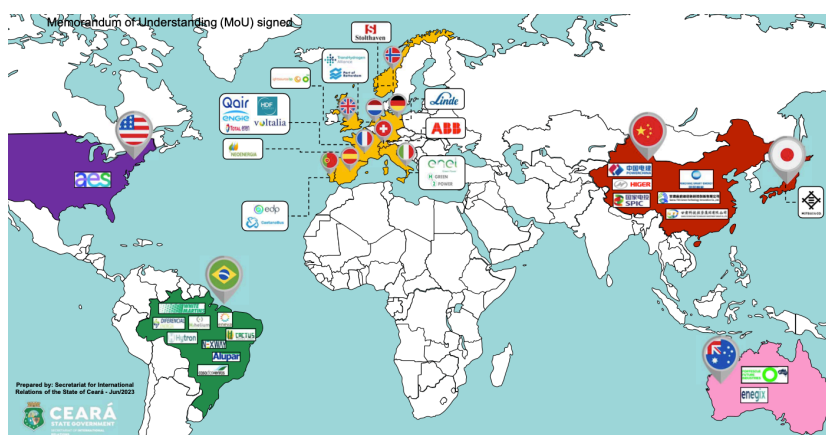
Um dos principais desafios observados neste estudo se refere às limitações regulatórias para desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde no Brasil. Apesar do arcabouço jurídico do país contemplar e reger as atividades econômicas de produção de gases industriais e amônia, enquadrando, assim, de forma objetiva e literal, a indústria de hidrogênio verde, é essencial que este setor tenha regulação própria, que leve em consideração sua dimensão estratégica e apelo sustentável.

Para tanto, considerando o interesse mútuo dos *stakeholders* deste ecossistema, bem como a celeridade dos movimentos de mercado, é fundamental que o governo e a indústria trabalhem em conjunto para garantir que a falta de legislação específica não se torne uma barreira para os investimentos nesse setor.

Uma colaboração efetiva entre o governo e a indústria pode resultar na criação de regulamentos mais adequados e adaptados às necessidades da indústria de hidrogênio. Esses regulamentos devem equilibrar a segurança, o desenvolvimento sustentável e a competitividade, estimulando o investimento e o crescimento do setor.

Averiguou-se que, apenas no estado do Ceará, já foram assinados 30 memorandos de entendimento entre o governo e empresas privadas para implantação de empreendimentos nesta área (O Povo, 2023²), evidenciando o rápido avanço e interesse dos investidores neste ramo.

ILUSTRAÇÃO 20 – Memorandos assinados pelo Governo do Ceará



Fonte: Secretaria de Relações Internacionais do Governo do Estado do Ceará. 2023.

Neste mesmo sentido, ressalte-se que, em janeiro de 2023, a primeira

² <https://mais.opovo.com.br/jornal/reportagem/2023/06/04/ceara-tem-mais-da-metade-dos-projetos-de-hidrogenio-do-brasil.html>

molécula de hidrogênio verde do país foi apresentada durante evento no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no Ceará³, o que reforça que o mercado já se movimenta de forma concreta para implementação.

Em âmbito da administração pública federal, já se discutem as diretrizes para regulação do setor, em especial no que se refere ao Plano Nacional de Energia 2050, que estabelece estratégias para direcionar o setor elétrico do país nas próximas décadas, garantindo a segurança energética, promovendo a diversificação da matriz geradora e mitigando os impactos ambientais inerentes à atividade.

O referido documento abrange diretrizes para a promoção do hidrogênio, incluindo investimentos em pesquisa e desenvolvimento, estímulo à produção e ao uso do hidrogênio verde, bem como a criação de infraestrutura adequada para sua produção.

Compondo o mesmo ambiente, o Programa Nacional do Hidrogênio, lançado em 2020, é uma iniciativa governamental específica que estabelecer um conjunto de ações que viabilize o desenvolvimento deste setor a partir de três pilares fundamentais: políticas públicas, tecnologia e mercado. Estes são eixos interdependentes e que precisam evoluir de forma coesa para que facilitar o plano estratégico estabelecido.

Em âmbito regional, o Estado do Ceará aprovou, em 2022, a primeira resolução de licenciamento ambiental para Hidrogênio Verde no Brasil, através da resolução Nº 03/2022, a qual estabelece os procedimentos, critérios e parâmetros que para o licenciamento de empreendimentos de produção do composto destinado à geração de energia no estado.

Ademais, encontra-se em tramitação na Assembleia Legislativa do Ceará, o Projeto de Lei nº 9.105, de 7 de agosto de 2023, o qual propõe a criação da Política Estadual do Hidrogênio Verde no Ceará⁴, o qual estabelece o desenvolvimento deste mercado como foco de interesse nacional e regional, assegurando o compromisso do Estado com o objetivo de aumentar a participação do composto na matriz energética local, contribuir para a diminuição de emissão de carbono, fomentar estudos e pesquisas na área, dentre outros.

Diante de toda a análise realizada, concluiu-se que, não obstante a criação

³ <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-do-pais-e-apresentada-durante-evento-no-complexo-do-pecem-no-ceara.ghtml>

⁴ <https://www2.al.ce.gov.br/legislativo/tramit2023/9105.pdf>

dos programas e iniciativas citados neste trabalho, é fundamental que se implemente um arcabouço concreto que contemple a dimensão e importância do mercado de hidrogênio verde, alinhado com padrões internacionais de modo a viabilizar o comércio exterior e promovendo a confiança e a eficiência na sua cadeia de suprimento.

5.3 CERTIFICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE

O resultado do presente estudo evidenciou a importância da definição normatizada do processo de certificação de hidrogênio no Brasil, de modo a atender os parâmetros internacionais e apoiar o mercado, como ferramenta essencial de caráter comprobatório acerca da origem e demais atributos da cadeia produtiva desta indústria.

No Brasil, o processo de certificação foi definido pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, órgão vinculado ao Governo Federal, que avaliará, primordialmente, as especificações contidas na Ilustração 21.

ILUSTRAÇÃO 21 – Especificações gerais para certificação do hidrogênio verde

CREITÉRIO	ESPECIFICAÇÃO
Fonte de origem do hidrogênio	Somente será considerado para fins de certificação o hidrogênio extraído a partir da água.
Produção	Exclusivamente eletrólise.
Fonte de energia utilizada	100% proveniente de fontes renováveis

Fonte: Próprio Autor

Verificou-se, pois, que, apesar de existirem outros métodos de produção de hidrogênio, inclusive utilizando a água como matéria prima, a atual norma de certificação brasileira se restringe ao processo de eletrólise a partir de geração de fonte renovável.

Adicionalmente, observou-se que a definição de “energia de fontes renováveis” utilizada seguiu o conceito estabelecido pelas diretrizes da União europeia, a qual classifica como aquela proveniente de fontes não fósseis, nomeadamente a “energia eólica, solar (térmica e fotovoltaica) e geotérmica, energia ambiente, das marés, das ondas e outras formas de energia oceânica, hidráulica, de biomassa, de gases dos aterros, de gases das instalações de tratamento de águas residuais, e biogás” (CCEE, 2022).

6. CONCLUSÃO

Diante de todo este cenário, percebe-se que a crescente preocupação com as mudanças climáticas e os impactos ambientais associados às fontes tradicionais de energia tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis e de baixa emissão de carbono. Nesse contexto, o hidrogênio verde surge como uma possibilidade promissora para auxiliar o setor energético em sua transição. Ao ser empregado como combustível e fonte de energia, o hidrogênio apresenta uma série de atributos que o tornam atrativo para mitigar os riscos e desafios globais relacionados às emissões de gases de efeito estufa e à implementação de uma matriz energética sustentável e diversificada.

Além de sua baixa emissão de carbono, a versatilidade do hidrogênio é outro aspecto que agrega relevância ao seu uso como vetor de impulso para fomento das fontes de energia mais sustentáveis. O composto pode ser utilizado de diversas maneiras, desde abastecimento de veículos no setor de transporte, até fornecer energia para sistemas de geração elétrica e armazenamento energético. Essa versatilidade torna o hidrogênio adaptável às necessidades e características específicas de diferentes setores da economia, ensejando uma abordagem integrada para a redução das emissões em vários domínios.

A adoção do hidrogênio como fonte de energia também impulsiona a diversificação da matriz energética. Ao depender menos de combustíveis fósseis, que são finitos e contribuem significativamente para as mudanças climáticas, aumenta-se a segurança energética vinculada a recursos renováveis, repercutindo, também, em maior competitividade de preços no mercado energético.

Assim, o composto vem confirmando sua expressividade como uma solução chave para enfrentar os desafios da transição energética para uma rota mais sustentável, observando-se uma sinergia global com o desenvolvimento e a implementação de tecnologias e políticas que promovam a produção, o armazenamento, a distribuição e o uso eficiente do hidrogênio em larga escala.

Por outro lado, à medida que se trilha o caminho para a criação de um mercado robusto e sustentável de hidrogênio, a construção de um arcabouço normativo que responda às necessidades específicas deste setor é fundamental, garantindo segurança jurídica e incentivos adequados para impulsioná-lo. Nesse sentido, as lacunas atuais no cenário regulatório podem ser um desafio para a

construção de um setor seguro e competitivo no mercado Brasileiro.

No Brasil, essa questão tem ecoado de forma semelhante àquilo que se observou em 2002 com o lançamento do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), um marco que desencadeou a expansão das energias renováveis no país, promoveu a diversificação da matriz elétrica brasileira e incentivou investimentos em fontes alternativas de energia.

Ressalte-se, ademais, que, ao passo que se molda a estrutura legal, é fundamental considerar a complexidade desse processo, uma vez que a regulamentação do mercado de hidrogênio não deve se limitar apenas ao estabelecimento de regras e normas para sua produção, distribuição e utilização, senão também a questões como certificações, padrões de qualidade, garantias contratuais e aspectos tributários. Tais elementos são cruciais para criar um ambiente propício à inovação e ao investimento, assegurando aos participantes do mercado uma base legal sólida e confiável.

Tendo em vista que as atividades ligadas à energia elétrica e combustíveis são reguladas pelo Poder Público, o que inclui agentes que possuem papel de controle, os diferentes níveis de governo têm se mantido atentos a esta necessidade, pelo que vêm editando diversas normas para viabilizar a estratégia de fomento ao mercado de hidrogênio.

Os governos, em seus diferentes níveis, compreendem a importância de estabelecer um ambiente regulatório que seja condutivo ao crescimento saudável e ordenado do mercado de hidrogênio. Dada a sua natureza estratégica e a interconexão com setores cruciais da economia, tais como transporte, indústria e geração de energia, o hidrogênio necessita de um quadro legal sólido e bem estruturado para promover eficiência, competitividade e segurança ao setor.

Neste contexto de crescente reconhecimento da importância desta indústria, o Estado do Ceará emerge como protagonista na trajetória de comprometimento e visão pioneira ao publicar as primeiras normas ambientais específicas para esse setor, demonstrando um claro entendimento da necessidade de uma abordagem regulatória específica para garantir o desenvolvimento de toda a cadeia de valor do hidrogênio.

Além da esfera regulatória, o estado tem adotado uma abordagem sistêmica para impulsionar o mercado, reconhecendo a importância da colaboração entre o setor público e privado. Ao celebrar diversos memorandos de entendimentos com empresas nacionais e estrangeiras, o Ceará dá passos concretos em direção à

implementação de um hub de hidrogênio, visando fomentar expertise, produção, pesquisa e inovação nessa área.

REFERÊNCIAS

- ABDIN, Zainul. **Hydrogen as an energy vector**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020
- ADITIYA H, Aziz M. **Prospect of hydrogen energy in Asia-Pacific: A perspective review on techno-socio-economy nexus**. International Journal of Hydrogen Energy (2021)
- AGLIARDI E, Agliardi R. **Financing environmentally-sustainable projects with green bonds** Environment and Development Economics (2019)
- AJANOVIC, A., SAYER, M., HAAS, R. **The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen**. International Journal of Hydrogen Energy. 2022
- ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/2IGf4Q0>. Acesso em: 24 jun. 2022.
- AYODELE.T.R., MUNDA J.L.. **Potential and economic viability of green hydrogen production by water electrolysis using wind energy resources in South Africa**. International Journal of Hydrogen Energy. 2019
- AVRAMOV, Doron. **Sustainable investing with ESG rating uncertainty**. Journal of Financial Economics. 2022.
- BOGDANOV, Dmitrii. **Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability**. Energy. 2021
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://aneel.gov.br>>. Acesso em: 5 mar. 2023.
- BRASIL. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://ccee.org.br>>. Acesso em: 5 mar. 2023.
- BRASIL. **Código Civil Brasileiro**, de 10 de janeiro de 2002. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10406.htm>. Acesso em: 7 mar. 2023
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constitui%C3%A7ao.htm>. Acesso em: 7 mar. 2023
- BRASIL. **Decreto n. 2.335**, de 6 de outubro de 1997. Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2335.htm>. Acesso em: 7 abr. 2023

BRASIL. **Decreto n. 5.163**, de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM>. Acesso em: 11 abr. 2023

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<http://epe.gov.br/>>. Acesso em: 11 abr. 2023.

BRASIL. **Lei n. 9.074**, de 7 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9074cons.htm>. Acesso em: 11 mar. 2023.

BRASIL. **Lei n. 9.427**, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427cons.htm>. Acesso em: 25 mar. 2023.

BRASIL. **Lei n. 10.847**, de 15 de março de 2004. Autoriza a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.847.htm>. Acesso em: 11 mar. 2023.

BRASIL. **Lei n. 10.848**, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nos 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.848.htm>. Acesso em: 11 mar. 2023.

BRASIL. Manual para Certificação de Hidrogênio. Disponível, de 7 de dezembro de 2022. Disponível em: <<http://ccee.org.br>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energias. Disponível em: <<http://mme.gov.br>>. Acesso em: 11 mar. 2023.

BRASIL. Operador Nacional do Sistema. Disponível em: <<http://ons.org.br>>. Acesso em: 11 mar. 2023.

CAMPOS, Clever. **Curso Básico de Direito de Energia Elétrica**. Brasília: Synergia, 2010.

CEARÁ. **Atlas Eólico e Solar apresenta potenciais de geração do Ceará**. 2019. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2019/05/30/atlas-eolico-e-solar-apresenta-potenciais-de-geracao-do-ceara/>. Acesso em: 24 jun. 2022.

CEARÁ. **Potenciais do Estado do Ceará para Produção de Hidrogênio Verde**. 2021. Disponível em: <https://parquetecnologico.ufc.br/pt/materialh2verde/>. Acesso em: 24 jun. 2022.

CHA J, Park Y, Jo Y. **An efficient process for sustainable and scalable hydrogen production from green ammonia***Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2021)

CLARK, Woodrow W. **A green hydrogen economy**. Energy Policy, 2006.

DAWOOD, Furat. **Hydrogen production for energy - An overview**. International Journal of Hydrogen Energy. 2020.

DI BLASI, Gabriel. **A propriedade industrial: os sistemas de marcas, patentes, desenhos industriais e transferência de tecnologia**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Forense, 2010.

DINCER, Ibrahim. **Green methods for hydrogen production**. International Journal of Hydrogen Energy. 2012.

DJELLOULI, Nassima. **The effects of non-renewable energy, renewable energy, economic growth, and foreign direct investment on the sustainability of African countries**. Renewable Energy. 2022.

EFTEKHARI, Ali. **Electrochemical hydrogen storage: Opportunities for fuel storage, batteries, fuel cells, and supercapacitors**. International Journal of Hydrogen Energy. 2017

FERREIRA, Renata Marques; FIORILLO, Celso Antonio Pacheco. **Curso de Direito da Energia**. Rio de Janeiro: Saraiva, 2009.

FRANÇA. **Guide Pour L'evaluation de la Conformite et la Certification des Systemes a Hydrogene Rapport Final**. 2021

GANIM, Antônio. **Setor Elétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Canal Energia, 2003.

HYDROGEN COUNCIL. **How Hydrogen Empowers the Energy Transition**. 2017.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen for Net-Zero**. 2021.

HYDROGEN COUNCIL. **Path to Hydrogen Competitiveness**. 2020.

HYDROGEN COUNCIL. **Policy Toolbox for Low Carbon and Renewable Hydrogen**. 2021.

HYDROGEN COUNCIL; MCKINSEY & COMPANY. **Hydrogen Insights 2022**. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Clean Energy Ministerial New Hydrogen Initiative**. 2019. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/1bd7d97f-9d48-4ae7-96f8-d8ed910b9833/CEMHydrogenInitiativeCooperationFrameworkfinal.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2021**. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Hydrogen**. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Hydrogen in Latin America**. 2021

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector**. 2021

KAZI, Monzure Khoda. **Green hydrogen for industrial sector decarbonization: Costs and impacts on hydrogen economy in Qatar**. Computers and Chemical Engineering. 2021

KOVAČ, Ankica. **Hydrogen in energy transition- A review**. International Journal of Hydrogen Energy. 2021.

LIU, Wei. **Green hydrogen standard in China: Standard and evaluation of low-carbon hydrogen, clean hydrogen, and renewable hydrogen**. International Journal of Hydrogen Energy. 2022

LUBBE, Foster; RONGÉ, Jan; BOSSEREZ, Tom; MARTENS, Johan A., **Golden hydrogen**. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2023.

OLIVEIRA, Alexandra M., **A green hydrogen economy for a renewable energy society**, 2023

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA PROPRIEDADE INTELECTUAL (OMPI). **Intellectual Property and Technology Transfer**. Disponível em: <https://www.wipo.int/technology-transfer/en/>. Acesso em 15 de jun. de 2023.

SHEEHAN N, VAIDYANATHAN G, KLASSEN M. **Making the invisible, visible: Overcoming barriers to ESG performance with an ESG mindset**. Business Horizons (2023)

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro**. Brasília: Synergia, 2011.

UNGRIA, José Alconchel, **Hydrogen patents for a clean energy future A global trend analysis of innovation along hydrogen value chains**. 2023

UNIÃO EUROPÉIA. **Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Programme review report 2022**, 2022

UNITED NATIONS GLOBAL COMPACT. **UN Global Compact Strategy 2021-2023**. 2021

VELAZQUEZ Abad, Anthony. **Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges**, Energy Policy, 2020.

WEGENER L. **Can the Paris Agreement Help Climate Change Litigation and Vice Versa?** Transnational Environmental Law (2020)