

Hidrogênio e a descarbonização da economia: Uma análise voltada ao artigo 4º do PL 725 de 2022

*Hydrogen and the decarbonization of the economy: An
analysis focused on Article 4 of Law Project n. 725 of 2022*

Gabriel Zanatta Tocchetto*
Vinícius Borges Fortes**

Resumo: A partir de problema de pesquisa que pergunta “Como se relaciona a previsão do artigo 4º do PL 725 de 2022 com o objetivo de descarbonizar a economia brasileira na prática?”, o trabalho discorre sobre a hipótese de um erro ter sido cometido na redação atual do artigo 4º do referido Projeto de Lei a partir da apresentação de uma estrutura focada em analisar a relação entre as expectativas sociais voltadas para conhecimentos científicos e o que o conhecimento científico apresenta na prática. O desenvolvimento do trabalho é dividido em duas seções, sendo a primeira voltada à verificação da dissonância entre o discurso científico e a opinião pública e a segunda à análise do que o conhecimento científico tem a dizer sobre o hidrogênio como vetor energético em si. O trabalho conclui que a redação atual do artigo 4º do PL 725/2022 possui um problema (falta de critério) capaz de tornar a efetivação da medida de aplicação de percentual de hidrogênio

* Advogado em matéria de Direito e Tecnologia desde 2018, doutorando em Direito pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná com bolsa CAPES/PROEX (2021), em regime de cotutela com a Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg. Mestre em Direito pela Faculdade Meridional Imed com bolsa CAPES/FAPERGS (com dissertação aprovada com distinção e louvor), Especialista em Direito Empresarial pela Faculdade Estácio. Bacharel no curso de Ciências Sociais Jurídicas – Direito, na Faculdade Meridional Imed em Passo Fundo -RS (2013-2017), com bolsa de IC FAPERGS. Empresário, proprietário da Hi ORDER Regulação e Tecnologia, do ramo de consultoria em Direito e Tecnologia e da Hi Sign, onde gerencia o desenvolvimento de ferramenta de assinaturas eletrônicas.

** Possui Estágio de Pós-Doutorado em Direito pela Vrije Universiteit Brussel, Bélgica (2016), com pesquisa voltada aos Direitos de privacidade na internet e o sistema de proteção de dados. Doutorado em Direito pela Universidade Estácio de Sá – UNESA (2015), com período sanduíche na Universidad de Zaragoza (2014-2015), com financiamento do PDSE/CAPES. Mestrado em Direito pela Universidade de Caxias do Sul (2011). Graduação em Direito pela FAPLAN – Faculdades Planalto (2008). Atualmente, é pesquisador e Bolsista de Produtividade em Pesquisa junto ao CETID – Centro de Pesquisa, Tecnologia e Inovação Digital da Fundação Meridional, no Projeto de Pesquisa “Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade”. Tem experiência profissional como advogado e empreendedor no segmento Lawtech.

Submissão: 21.11.2022. **Aceite:** 12.12.2023.

nos gasodutos brasileiros uma operação contraproducente para o processo de descarbonização da economia.

Palavras-chave: Descarbonização; Direito e novas tecnologias; Eficiência; Hidrogênio; Mudanças climáticas.

Abstract: Based on a research problem that asks “How does the prediction of article 4 of Law Project (LP) 725 of 2022 relate to the objective of decarbonizing the Brazilian economy in practice?”, the work discusses the hypothesis that an error has been made in the current wording of article 4 of the aforementioned bill based on the presentation of a structure that analyzes the relationship between social expectations focused on scientific knowledge and what scientific knowledge presents in practice. The development of the work is divided into two sections, the first being aimed at verifying the dissonance between scientific discourse and public opinion and the second analyzing what scientific knowledge has to say about hydrogen as an energy vector in itself. The work concludes that the current wording of article 4 of LP 725/2022 has a problem (lack of criteria) capable of making the implementation of the measure of application of percentage of hydrogen in Brazilian gas pipelines a counterproductive operation for the decarbonization process of the economy.

Keywords: Decarbonization; Law and new technologies; Efficiency; Hydrogen; Climate changes.

Introdução

Um dos assuntos mais latentes no ano de 2022, especialmente considerando o período pré-guerra na Ucrânia, é o assunto do meio-ambiente, discutidos muitas vezes a partir dos ODS 2030, exatamente pelo fato de que estão cada vez mais latentes os efeitos da ação humana sobre a natureza e mais reais os justificados receios de que isso deve modificar radicalmente o padrão de vida da humanidade nos próximos anos. Nesse contexto, a valoração de inovações vinculadas à sustentabilidade e à economia verde carregam consigo importante peso no imaginário do público em geral, sendo inclusive objeto de discussões sobre a matéria de *greenwashing*³ e sobre iniciativas que erram no ato de gerar os efeitos esperados em nível de idealização ou da expectativa criada no público a partir do discurso proposto.

Nesse contexto, no dia 28 de março de 2022, é proposto o Projeto de Lei nº 725 (PL 725), que versa sobre “a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável” (Brasil, 2022). Com um erro verificável já em sua ementa, que trata do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, o projeto conta com uma lógica simples por trás

³ O termo *greenwashing* define o ato de mascarar ações sem impacto ou danosas ao meio ambiente como ecológicas, “verdes”.

da justificativa apresentada: colocar obrigações específicas sobre o “hidrogênio sustentável” em gasodutos brasileiros deve incentivar e baratear o vetor em território nacional e isso deve ter consequências positivas para a descarbonização da economia brasileira.

Não tão diferente de ocorrências de *greenwashing*, o hidrogênio pode por vezes tornar o objetivo de descarbonização da economia uma vítima de seu sucesso, de forma parecida (mesmo que invertida) com a qual se relacionam estigmas específicos que divergem do conhecimento científico de fato sobre matérias relacionadas especialmente com os impactos da ação humana no meio-ambiente. Como um vetor energético que hoje carrega importantes embargos operacionais em sua cadeia de produção e consumo, a medida do artigo 4º, de adotar percentuais de uso dessa matéria em gasodutos a partir de um critério meramente temporal parece ser um erro, vez que nada garante que, ao tempo de o prazo de 2032 chegar, a eficiência do vetor será eficiente, ou mesmo viável, que a matriz energética do país terá capacidade de operar o excedente necessário para a adequação à legislação sem necessidade de medidas que desvirtuem o propósito do projeto em si.

A partir dessa situação, o presente trabalho coloca o problema de pesquisa formulado a partir da seguinte pergunta: Como se relaciona a previsão do artigo 4º do PL 725 de 2022 com o objetivo de descarbonizar a economia brasileira na prática? Um problema para o qual o trabalho hipotetiza que, como uma tecnologia que cumpre a função de vetor energético, o hidrogênio possui potencial para resolver um problema importante do uso energético no Brasil e no mundo e resolve problemas importantes colocados pelo uso tradicional de baterias recarregáveis (hoje produzidas em liga de lítio), mas esse potencial precisa ainda vencer alguns obstáculos práticos para se tornar eficiente na atividade de operar o processo de descarbonização da economia brasileira, sendo a definição do prazo temporal de forma simples para um ano em específico (2032) insuficiente para a verificação de que a medida gerará resultados positivos para o referido processo.

O objetivo geral do trabalho é discorrer sobre a matéria do hidrogênio como vetor energético de forma a esclarecer e quiçá apresentar uma solução para a situação dissonante entre a matéria aos olhos da ciência e aos olhos do PL 725 de 2022, considerando as nuances específicas da tecnologia de produção, armazenamento e consumo de hidrogênio hoje. Os objetivos específicos do trabalho são: discorrer sobre o fenômeno de dissonância da leitura feita pelo público em geral e pelos agentes decisores em matéria de políticas públicas sobre assuntos caros ao conhecimento científico e ao combate da ação humana no meio-ambiente (1); analisar alternativas para o discurso sobre a matéria do hidrogênio como vetor (2) e; apresentar o contexto fático-científico sobre a matéria, com foco em

esclarecer como podem se dar os danos gerados por um discurso dissonante ao conhecimento científico, concretamente sob a ótica da possível regulamentação de percentual mínimo de hidrogênio em gasodutos no Brasil.

O argumento, que aqui se desenvolve a partir do método hipotético-dedutivo, se coloca a partir da premissa maior de que erros no discurso e na adoção de medidas, mesmo que bem intencionados, podem gerar consequências negativas ao meio-ambiente; a premissa menor de que tal erro pode se concretizar na prática caso a definição do artigo 4º do PL 725 de 2022 não seja acompanhado de quesitos e métricas capazes de medir a eficácia da adoção do hidrogênio como vetor energético no ato de definir percentuais; tendo como conclusão hipotética que é importante que a redação do artigo 4º do PL mencionado seja alterada para comportar a complexidade desses quesitos.

Opinião pública e ciência, entendendo a relação entre o conhecimento científico e as ações tomadas na esfera pública

O texto do Projeto de Lei de nº 725/2022 (Brasil, 2022) opta, de forma curiosa, pela definição de percentual mínimo de hidrogênio nos gasodutos a partir do ano de 2032, dez anos após o ano de propositura do projeto, uma previsão que parece conservadora. A redação do dispositivo do artigo 4º do projeto aparenta ser questionável e não adequada à emergência global gerada pelos problemas causados pela ação humana no meio-ambiente, especialmente considerando as expectativas de descarbonização da economia e o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13 da agenda 2030 da ONU, que versa sobre a ação contra a mudança global do clima (IPEA, s.a.).

Uma conclusão direta e simples da leitura da justificativa do Projeto de Lei 725/2022 é a de que o hidrogênio pode servir como catalisador no processo de transformação do Brasil em uma economia descarbonizada, considerando que esse hidrogênio seja produzido como hidrogênio verde (Pereira *et al.*, 2023, p. 2), que o documento chama de “hidrogênio sustentável” (Brasil, 2022, p. 3). Em todos os casos, seja consequência da complexidade do assunto ou do escopo da proposta, essa espera de dez anos para implementação da medida, prevista no artigo 4º, nunca é explicada, ao tempo que passa a fazer sentido a proposta a partir do penúltimo parágrafo da justificativa, onde são mencionados os países que “buscam o hidrogênio sustentável como uma das soluções para o futuro”, lista da qual o Brasil passaria a fazer parte.

A ciência pode ser vista como um processo que passa por caminhos tortuosos, um fluxo que pode encontrar diversos óbices colocados por situações fáticas e expectativas humanas. Ao tempo que é comum verificar objetivos macros sob a

ótica do desenvolvimento científico em certos recortes históricos, como é o caso da corrida espacial da Guerra Fria e do aquecimento global na atualidade, seria difícil arguir em qualquer ponto no tempo a independência da prática científica em relação à opinião pública.

A complexidade do conhecimento científico é tal que a importância de análise de decisões por diversos ângulos pode ser a diferença entre a manutenção de decisões que geram danos ambientais, estagnam o desenvolvimento tecnológico e ainda podem custar vidas humanas no caminho. A tomada de decisões na prática pode seguir caminhos que são muito mais uma consequência da imagem carregada por tecnologias ou mesmo medidas do que pelo resultado frio do conhecimento científico sobre a matéria. Alguns tipos de tecnologia carregam consigo estigmas criados no imaginário do público geral por fatos específicos e outros tipos de tecnologia carregam estigmas gerados pelo medo generalizado de consequências que, apesar de tecnicamente possíveis, não guardam razão na prática.

Um exemplo do primeiro caso se relaciona diretamente com o assunto de energias, que é o que ocorre com a energia nuclear, que carrega não só o estigma de Chernobyl, em 1986 (Renn, 1990), mas o de Fukushima, que reacendeu os medos em relação à tecnologia no ano de 2011 (Koo *et al.*, 2014). O segundo caso, de receios infundados sem incidentes paradigmáticos, ocorre com a transgenia (que não deve ser confundida com o uso de agrotóxicos), um assunto muito marcado pela efetividade dos óbices da opinião pública sobre a sobrevivência dessas práticas no mercado.

The disjunction between scientific consensus and public opinion on the topic of GMOs is disturbing, to say the least. I see it as partly a reflection of the breakdown in communication between scientists and the public at large. Already in my relatively short time working on CRISPR, I've discovered how challenging it can be to maintain a constructive, open dialogue between these two worlds – but also how necessary that kind of communication is for the advancement of scientific discoveries⁴ (Doudna; Sternberg, 2017, p. 125).

Essa disparidade (ou disjunção) entre a opinião pública e o conhecimento científico é um dos grandes desafios colocados nas costas do conhecimento científico pós Segunda Guerra Mundial, seja em decorrência da crescente complexidade do conhecimento científico em si, ou em decorrência do uso do populismo rela-

⁴ Tradução livre: A disjunção entre o consenso científico e a opinião pública sobre o tema dos OGM é no mínimo perturbadora. Eu vejo isso em parte como um reflexo da falha na comunicação entre os cientistas e o público em geral. Já em meu tempo relativamente curto trabalhando com CRISPR, descobri o quão desafiador pode ser manter um diálogo construtivo e aberto entre esses dois mundos – mas também o quão necessário esse tipo de comunicação é para o avanço das descobertas científicas.

cionado à ciência (Mede; Schäfer, 2020, p. 475). Nos últimos anos, o risco dessa disparidade aparece no mundo como uma realidade cujas consequências são de fácil percepção, uma realidade colocada pela pandemia de COVID-19, na qual teorias da conspiração geraram consequências negativas nas intenções de pessoas no cumprimento de recomendações governamentais (Douglas, 2021, p. 271), recomendações cujo foco era de evitar o espalhamento do vírus de o aumento de mortes causadas pela doença (Douglas, 2021, p. 272).

Ao contrário da situação pandêmica, o estigma carregado pela transgenia e pela produção de energia nuclear estão vinculados a um problema perene do mundo moderno: os efeitos gerados no meio-ambiente pela ação humana. O desastre de Chernobyl teve como consequência decisões de eliminação gradativas (em níveis e velocidades diferentes) de economias, sendo possível destacar as medidas adotadas pela Itália, Alemanha, Cazaquistão e Lituânia a partir do ocorrido em 1986 (Právělie; Bandoc, 2018, p. 82), decisões que são justificadas pela complexidade das consequências das ações humanas no meio-ambiente, em uma situação onde a energia nuclear produzida por fissão gera danos ambientais em decorrência dos rejeitos radioativos gerados por esse processo de produção, apesar de desconsiderar as situações específicas do desastre de Chernobyl e as plantas nucleares em si ficarem mais seguras com o passar do tempo (Právělie; Bandoc, 2018, p. 91), além das consequências de alteração de matrizes energéticas desses países que, como é o caso da Alemanha, acabam não só dependentes de gás natural, mas refêns do mercado internacional dessa *commodity* (Krebs, 2022).

Apesar da existência de situações nas quais as consequências de decisões específicas fazem sentido por motivos diversos dos que os que justificaram a decisão na prática, existem decisões onde esse não é o caso, e as consequências diretas da opinião pública colocam consequências sem benefícios aparentes. Esse é o caso das repetidas tentativas de criação de processos ambientalmente responsáveis por vias de transgenia.

A Canadian team created the Enviropig, an environmentally friendly transgenic pig containing an E. coli gene that allowed the animals to better digest a phosphorus-containing compound called phytate. Normal pig manure retains high phosphorus levels that leach into streams and rivers, causing algal blooms, the death of aquatic animals, and the production of greenhouse gases; Enviropig manure contained 75 percent less phosphorus, which could have been an enormous benefit to the planet and to the people who lived and worked near pig farms. Despite this, though, and despite reassuring safety data, consumers decried the Enviropig, causing the project's financial backers to pull the plug. The new breed was finally euthanized in 2012⁵ (Doudna; Sternberg, 2017, p. 129).

⁵ Tradução livre: uma equipe canadense criou o *Enviropig*, um porco transgênico ecologicamente

Ao contrário da energia nuclear e da transgenia, o hidrogênio carrega uma imagem positiva em relação ao seu papel e às suas capacidades. Como uma metodologia de armazenamento conveniente (de rápido reabastecimento) e denso em termos energéticos (Okolie *et al.*, 2021, p. 8.888), com a possibilidade de tornar processos que hoje emitem importantes quantidades de carbono em processos sem emissões (Brasil, 2022), o hidrogênio é visto como algo que precisa fazer parte dos fluxos energéticos de países no futuro. Ocorre que quando o futuro é definido a partir de um marco temporal e não a partir da solução de embargos à implementação útil da tecnologia⁶, o processo passa a ter potencial de não gerar os resultados esperados que, no caso, são vinculados à descarbonização da economia.

O caso do hidrogênio apresenta um receio desvinculado do objeto que é mal interpretado, potencializado pela imagem do problema das mudanças climáticas e do medo de diminuição da qualidade de vida da humanidade nos próximos anos. No lugar de criar um monstro a partir do qual o receio generalizado faz a humanidade correr, o receio cria a demanda por institutos capazes de solucionar o problema de forma simples e direta, criando “soluções” que não fazem necessariamente o papel de solucionar problemas de fato, mas de criar de esperanças que não necessariamente estão vinculadas à realidade do discurso científico sobre a matéria.

Apesar de não ser um tema de tanta circulação no Brasil, o hidrogênio já é tratado em muitos lugares do mundo (McManus, 2018), inclusive no PL 725, como uma alternativa viável para a descarbonização da economia de países, em um discurso que tende a ganhar espaço em território nacional e que tem potencial de travestir o hidrogênio como uma solução dissonante dos seus potenciais reais hoje. É a partir desse receio que a presente narrativa pode fazer diferença na adoção de medidas contraproducentes no Brasil.

correto contendo um gene de *E. coli* que permitiu aos animais digerir melhor um composto contendo fósforo chamado fitato. O esterco de porco normal retém altos níveis de fósforo que se infiltram em córregos e rios, causando proliferação de algas, morte de animais aquáticos e produção de gases de efeito estufa; O estrume do *Enviropig* continha 75% menos fósforo, o que poderia ter sido um enorme benefício para o planeta e para as pessoas que viviam e trabalhavam perto das fazendas de porcos. Apesar disso, e apesar dos dados de segurança tranquilizadores, os consumidores criticaram o *Enviropig*, fazendo com que os financiadores do projeto desistissem. A nova raça foi finalmente sacrificada em 2012.

⁶ O uso de um marco que considere a solução dos embargos à implementação da tecnologia implica aqui no reconhecimento das limitações colocadas pela realidade hoje, definindo que quando a eficiência de produção e consumo do vetor superasse certa marca (comparativa ou direta), a implementação ocorreria. Essa definição tornaria o PL à prova de falhas ou mesmo de inovações que torne o vetor ainda menos eficiente, comparativamente.

Hidrogênio como mocinho, entendendo narrativas possíveis para o PL 725/2022

Como mocinho coadjuvante de um filme de guerra, que é escalado para salvar o mundo sem ter experiência para tanto, o hidrogênio pode sofrer com o peso do seu sucesso, de expectativas globais heroicas na história atualmente em curso do que pode-se chamar de “guerra contra as mudanças climáticas”. Enquanto parece concebível dar papéis como os de John Coffey⁷ à transgenia, e de Elizabeth Sherman⁸ à energia nuclear, ainda não está claro se o hidrogênio seria selecionado para o papel de Tom, Thomas Blake⁹, ou de Sam, Samwise Gamgee¹⁰.

Como uma história que está em curso, ainda não é certo como nem o que ocorrerá, sendo a definição de papéis uma parte importante na definição do final da história da humanidade. O presente trabalho argui que simplesmente torcer para que a tecnologia se encontre no patamar Sam em 2032 é não só abrir espaço para que tenhamos um Tom nessa época, mas o equivalente a escrever um filme apocalíptico, com expectativas de final feliz e dar as expectativas de realização da trama para qualquer Elizabeth Sherman, que pode terminar queimando todo o elenco na cena final, ao perceber o falecimento de alguém durante o desenrolar da trama.

O principal problema do hidrogênio como vetor energético é que, no estado da técnica, ele não se apresenta como uma solução para o complexo problema energético da humanidade hoje, em decorrência de dois importantes fatores: a humanidade não se encontra em uma situação de produção plena de energias renováveis e o crescimento no consumo energético, mesmo que balizado no consumo de energias limpas para finalidades específicas, significa o aumento de consumo de combustíveis fósseis para a produção energética (1) e; o hidrogênio é

⁷ Personagem injustamente preso em “À Espera de um Milagre”, filme do ano 2000, John Coffey é um negro com poderes sobrenaturais que é injustamente preso e condenado à morte em um contexto racista estadunidense por tentar salvar duas crianças brancas violentamente machucadas, John é eventualmente morto por ser percebido como perpetrador da violência nas crianças.

⁸ Coadjuvante pirocinética da série de filmes *Hellboy*, série de filmes que inicia em 2004 e tem seu último filme lançado em 2019, Elizabeth Sherman tem o poder e a maldição de gerar fogo e queimar seus arredores, sem ter controle total sobre essa habilidade, que é por vezes ativada como consequência de traumas ou reações emocionais da personagem, machucando aqueles que a rodeiam.

⁹ Militar que não sobrevive para entregar a informação que salva a vida de seus compatriotas e seu irmão, no aclamado filme de 2020 sobre a Primeira Guerra Mundial intitulado “1917”.

¹⁰ O *hobbit* que acompanha o protagonista Frodo Baggins em “O Senhor dos Anéis”, trilogia de filmes lançados respectivamente em 2001, 2002 e 2003 que é baseada nas obras homônimas do autor J.R.R. Tolkien, durante o século XX. Sam é como o fiel escudeiro de Frodo durante toda a saga rumo à vitória do bem contra o mal, se mostrando por vezes mais incorruptível que o próprio protagonista.

um vetor energético ineficiente, considerando o contexto atual das tecnologias de produção, armazenamento e utilização do vetor, algumas estimativas calculadas a partir de fontes diversas o colocam na posição de ser cerca de 50% menos eficiente que o principal concorrente, as baterias de ligas de lítio (McManus, 2018) (2). Nesse contexto o hidrogênio é um candidato forte para o papel do falecido Tom, no elenco da história contada pelo PL 725/2022, caso o contexto tecnológico do vetor ou a situação das matrizes energéticas não mudem até o arbitrário ano de 2032.

Hidrogênio como vetor energético

Ao contrário do que a ementa do Projeto de Lei de nº 725/2022 faz crer (Brasil, 2022), as aplicações do hidrogênio em matéria de energia não se assemelham tanto com o que se chama de fonte de energia, sendo mais adequado denominar essa função do elemento químico como a de vetor energético. Fontes de energia são aquelas de onde se extrai energia para usos diversos, que podem ser perfectibilizados de forma imediata (via consumo direto da rede, por exemplo) ou não (quando se armazena a energia em um vetor como uma bateria de lítio, para uso em situações específicas e dentro dos limites e capacidades de entrega do vetor em específico).

Para obter o H₂ a partir dos elementos com os quais se encontra ligado na Terra, é necessário extraí-lo, com exigência energética para o processo de separação, e com os inerentes custos económicos. Uma vez que o H₂ não se encontra isolado na natureza e que para a sua produção é necessário utilizar outro tipo de energia, o hidrogênio é considerado um vetor energético, e não propriamente uma fonte de energia (como é o caso da solar ou eólica). [...] Acresce ainda outras características como: é incolor, inodoro e não tóxico, o que atribui ao Hidrogênio um enorme potencial como vetor energético do futuro (DA COSTA SOUTO; NOGUEIRA, 2021, p. 47).

Como um vetor de energia, o hidrogênio apresenta importantes características que o diferenciam do mais importante vetor de energia com potencial de descarbonizar o setor de transportes hoje, o vetor das baterias de ligas de lítio. O hidrogênio pode ser utilizado como vetor em motores à combustão (Babayev *et al.*, 2022) e motores elétricos, os chamados veículos de célula de combustível, que transformam a energia química do hidrogênio em energia elétrica (Xu *et al.*, 2022, p. 2).

As principais vantagens do hidrogênio estão ligadas à sua densidade energética, armazenamento e suas características de desgaste, metodologia e tempo de abastecimento, enquanto suas principais desvantagens estão ligadas à ineficiência da produção, manejo e consumo de hidrogênio e; seu custo energético. Todas

vantagens e desvantagens em comparação com baterias de ligas de lítio. Hoje, em decorrência dessas desvantagens, o hidrogênio se coloca para o mercado, para o ODS 13 e para a narrativa em curso sobre a “guerra contra as mudanças climáticas” como Tom, sendo a superação desse paradigma o que pode elevá-lo ao status de Sam, o que pode ou não acontecer até a data definida pelo artigo 4º do Projeto de Lei 725 de 2022.

As vantagens do hidrogênio sobre as baterias de ligas de lítio

A densidade energética de vetores energéticos é um fator essencial para um número importante de características e usos desses vetores. Uma forma simples de pensar nessa característica é pensar na estrutura e uso de veículos automotores, cuja utilidade está muito ligada à sua autonomia, diga-se, a quantidade de quilômetros que o veículo consegue andar sem a necessidade de reabastecimento.

Densidade energética, no contexto de análise do presente trabalho, é definida pela relação entre a quantidade de energia útil que unidade de peso de um vetor energético é capaz de armazenar. O que essa medida define é quanto de peso é necessário para adicionar quantidade de energia (que resulta em autonomia em km rodados no caso de veículos automotores) ao armazenamento feito por vias do vetor.

Na métrica de densidade energética o hidrogênio ganha por uma distância importante das baterias de ligas de lítio. Com uma densidade energética específica de 39.402 Wh/Kg¹¹ (Hassanpouryouzband *et al.*, 2021, p. 2.181), o hidrogênio está muito à frente dos 230 Wh/Kg das baterias de lítio (Hannan *et al.*, 2018, p. 19.364), mesmo considerando os avanços tecnológicos (Xu; Cai; *et al.*, 2022, p. 1) que aumentam constantemente, mas não miraculosamente, a densidade específica das ligas utilizadas para esse fim, uma característica que enaltece o currículo do hidrogênio para o papel de Sam. Essa diferença não é só prática, mas teórica, sendo que mesmo algumas promissoras ligas de lítio possuem potenciais de armazenamentos que, por mais que interessantes, não alcançam os referidos 39.402 Wh/Kg, sendo exemplos disso as baterias de liga de lítio com enxofre (Li-S) e lítio com oxigênio (Li-O2), que possuem densidades energéticas, respectivamente de 2.567 Wh/Kg e 3.505 Wh/Kg.

Para todos os fins, a densidade energética baixa das baterias de lítio leva veículos que buscam uma autonomia maior a serem mais pesados, o que resulta

¹¹ Convertido do original, que media em Mj/Kg (megajoule por quilo), indicando 141.86 Mj/Kg, para equiparar à medida do artigo sobre as baterias de lítio. Medida de potência por hora (o Watt indica o trabalho de 1 joule por segundo e 1 Watt-hora equivale a 3.600 joules no intervalo de tempo de uma hora) dividida pela massa do vetor: Wh/Kg = Watt-hora/quilograma. A fórmula de conversão aproximada é: Mj↔W/h 1Mj = 277.777778 W/h.

num desperdício de energia maior em decorrência do peso e a num aumento de custo estrutural dos veículos, que precisam carregar de forma adequada esse peso mas, mais que essas restrições, a densidade energética das baterias é um óbice até hoje não superado para o transporte de cargas pesadas em caminhões, o motivo pelo qual até hoje esse tipo de solução existe muito mais como promessas do que como realidade.

In the development and marketing of electric long-haul trucks with ranges of 400-600 miles, the energy density (Wh/kg and Wh/L), cycle life, and cost of the battery will be critical. As shown in Table 1, the battery must store 700-1000 kWh to achieve those long ranges. Unless the energy density of the battery pack is 300-400 Wh/kg, the battery will be too heavy and large to fit on the tractor of the long-haul vehicle. The 2170 lithium cell (5 Ah) presently used in the Tesla passenger cars has energy densities of 250 Wh/kg and 500 Wh/L. In a battery pack, the pack energy densities would be less than about 200 Wh/kg and 350 Wh/L¹² (Burke, 2022, p. 5).

Outra característica direta que reforça o hidrogênio no papel do coadjuvante Sam é a metodologia de armazenamento e o desgaste gerado pelo uso e ciclos do vetor. O armazenamento do hidrogênio em veículos ou cartuchos de hidreto (Malleswararao *et al.*, 2022) é um armazenamento que ocorre por meio da inserção física de hidrogênio comprimido ou resfriado em recipientes, um procedimento parecido com o abastecimento de gás natural em veículos com GNV, enquanto o carregamento de veículos com baterias de lítio ocorre de uma forma mais parecida com o carregamento de telefones celulares ou computadores, sendo a velocidade de carregamento um importante empecilho do uso de baterias (Nykvist; Olsson, 2021, p. 902).

Para além do tempo de demora no ato de abastecer veículos, outro obstáculo colocado pelo aumento da densidade energética das baterias de lítio é o número de ciclos que essas baterias precisam aguentar para que o custo benefício delas seja superior ao do uso de diesel (Burke, 2022, p. 6), um fator que não é problema para o uso de hidrogênio, vez que o consumo da energia é em si a transformação e descarte do vetor, que precisa ser produzido novamente para uso. Isso tudo sem

¹² Tradução livre: No desenvolvimento e comercialização de caminhões elétricos de longo curso com autonomia de 400 a 600 milhas, a densidade de energia (Wh/kg e Wh/L), a vida útil do ciclo e o custo da bateria serão críticos. Conforme mostrado na Tabela 1, a bateria deve armazenar 700-1000 kWh para atingir esses longos alcances. A menos que a densidade de energia da bateria seja de 300-400 Wh/kg, a bateria será muito pesada e grande para caber no trator do veículo de longo curso. A célula de lítio 2170 (5 Ah) atualmente usada nos carros de passeio da Tesla têm densidades de energia de 250 Wh/kg e 500 Wh/L. Em uma bateria, as densidades de energia da bateria seriam inferiores a cerca de 200 Wh/kg e 350 Wh/L.

contar a administração do descarte e reciclagem de baterias, um problema que fica para além do escopo do presente trabalho.

As vantagens das baterias de ligas de lítio sobre o hidrogênio

Na prática, apesar de um número maior de fatores que o colocariam como Sam, o hidrogênio possui dois fatores importantes que colocam a análise fria dessa tecnologia em uma possível situação de Tom, que pode não sobreviver à missão e ser nada mais do que uma memória na realidade onde a economia encontra seu objetivo de “net zero” emissões de carbono. Enquanto as baterias de lítio possuem a característica de existirem como um sistema que precisa meramente ser “ligado na tomada”, mais maduro e amplamente adotado no mercado, seu processo de carregamento e descarregamento é mais simples e possui menos pontos onde se perde energia para processos em específico, o que na prática faz com que o consumo energético do hidrogênio para cada 100 km rodados, 126 Mj, seja equivalente a 202,31% do consumo energético para rodar os mesmos 100 km em um carro com baterias de lítio, 62,28 Mj (Yang *et al.*, 2020, p. 5).

*Hydrogen production by water electrolysis is a promising method which consumes electricity and the consumed electricity can come from different sources. Alkaline electrolyser is the most mature technology for water electrolysis. The theoretical maximum electrolysis efficiency is about 85%, but the realistic electrolysis efficiency is generally lower. Therefore, the efficiency of hydrogen production by electrolysis is considered as 73.8%. The power generation efficiency of State Grid is 47.06% (Table 6). The total efficiency of hydrogen production by electrolysis from State Grid is 34.73%.¹³ (Yang *et al.*, 2020, p. 5)*

Isso de forma alguma significa que essa tendência deve persistir com o passar do tempo, mas esse certamente é um marco que precisa ser considerado como critério para a adoção de padrões mínimos de percentuais de hidrogênio em gasodutos no Brasil em 2032, vez que ignorar esse fator pode significar adotar uma solução para descarbonização que na verdade aumenta o custo de descarbonização da economia brasileira. Algo parecido com esse erro de cálculo é realidade na produção de etanol nos Estados Unidos onde, subsidiado pelo governo norte americano, a produção de etanol ocorre com foco em diminuir a

¹³ Tradução livre: A produção de hidrogênio por eletrólise da água é um método promissor que consome eletricidade e a eletricidade consumida pode vir de diferentes fontes. O eletrolisador alcalino é a tecnologia mais madura para eletrólise da água. A eficiência de eletrólise máxima teórica é de cerca de 85%, mas a eficiência de eletrólise realista é geralmente menor. Portanto, a eficiência de produção de hidrogênio por eletrólise é considerada de 73,8%. A eficiência de geração de energia da rede elétrica é de 47,06% (Tabela 6). A eficiência total da produção de hidrogênio por eletrólise da a partir da rede é de 34,73%.

pegada de carbono do país, em uma produção que custa por litro de etanol 6.597 kcal, sendo esse litro de etanol equivalente a energia armazenada de 5.130 kcal (Pimentel; Patzek, 2005, p. 67), um processo deficitário que acaba não só não cumprindo com a expectativa de diminuição de pegada de carbono do país, mas contribuindo para o aumento dessa pegada de carbono.

O problema do hidrogênio no Brasil não é o mesmo do problema do etanol dos Estados Unidos, mas é semelhante em alguns pontos. Como já se verifica um custo energético para o transporte regular e esse custo energético já é computado em uma matriz energética que vez e outra passa por ameaça de apagões por falta de energia (Nascimento, 2018), aumentar o consumo energético de forma ineficiente apresenta um direto impacto na necessidade de aumento de produção energética no Brasil, com potencial de gerar impacto nas pegadas de carbono tanto via construção de hidrelétricas quanto no caso de uso de combustíveis fósseis para suprir essa demanda, como é o caso do que ocorre no Amapá (Após 21 [...], 2020)¹⁴.

Além do custo energético de produção, outro fator importante coloca desvantagem no placar do hidrogênio para abastecimento de veículos automotores é o custo de abastecimento por quilômetro rodado que, apesar de contar com metade da eficiência energética, conta com uma disparidade ainda maior em valores monetários. Em 2018, abastecer um veículo movido a hidrogênio no estado da Califórnia nos Estados Unidos custava oito vezes o valor por quilômetro rodado em comparação com veículos elétricos movidos a baterias de ligas de lítio (McManus, 2018), mas é importante notar que esse é um fator que a definição percentual do artigo 4º do Projeto de Lei 725/2022 deve mudar diretamente, vez que o custo de produção de hidrogênio está diretamente ligado à baixa utilização desse vetor como combustível de veículos.

Conclusão

Como um mocinho coadjuvante com cara de Sam e potencial de Tom, é importante que sejam adequadas às expectativas em relação ao uso do hidrogênio como vetor energético por parte do PL 725/2022. A morte de Tom em um dos atos intermediários da “guerra contra as mudanças climáticas” pode significar a necessidade de desativar uma indústria inteira vinculada à produção de hidrogênio

¹⁴ É possível levantar o argumento da Escala de Kardashev como um norte para a definição de custos e operação energética no mundo, mas importante a verificação de que os países têm traçado um caminho muito mais focado em desafogar as necessidades energéticas de uma população cujo custo energético de manutenção da tecnologia e conforto só aumentam do que um caminho de produção excedente de energia elétrica como um todo, sendo inclusive analisado o uso de veículos a hidrogênio como forma de gerir essa relação de escassez em momentos de maior uso de energia (LI *et al.*, 2022).

e dependente da obrigação legal colocada pela legislação a partir de um marco temporal, o que se coloca como um procedimento traumático independente do nível de ineficiência hidrogênio como vetor energético, exatamente como ocorre na gigantesca indústria estadunidense de etanol, que não só desperdiça energia, mas depende de injeção de dinheiro do Estado para sobreviver.

É importante aclarar que existe possibilidade de o hidrogênio como vetor energético passar no teste de eficiência em comparação com o uso de baterias ou vetores diversos até o ano de 2032 e que o presente trabalho sequer pratica esforço de demonstrar o contrário. No lugar disso, o desenvolvimento aqui executado pratica o ato de perguntar o que deve ocorrer se esse teste não for vencido até tal data, uma possibilidade que ganha importância na medida em que o foco do mundo tem se voltado ao uso de poder bélico e do receio de conflitos armados desde o início da guerra na Ucrânia.

Quando o assunto do hidrogênio contar com o foco da opinião pública no Brasil, caso essas expectativas não tenham sido superadas, é muito provável que a implementação de medidas de forma acrítica ou independente da análise específica da eficiência das medidas para a descarbonização da economia. Caso uma alteração no dispositivo do artigo 4º do PL em evidência seja alterado até então é muito mais fácil de verificar a criação de um coadjuvante adequado ao papel de Tom, exatamente porque a construção do imaginário tende a ver de forma muito mais simples soluções que já estão colocadas diante de si, como uma métrica que define a eficiência como critério de implementação de alterações regulamentares.

É a partir dessa estrutura que o trabalho termina por confirmar a hipótese, que preconiza que apesar de ter potencial para resolver um problema importante do uso energético no Brasil, o hidrogênio como vetor energético precisa se provar em termos de eficiência em comparação com o uso de outros vetores para se tornar uma opção viável à implantação via política de percentual mínimo do Brasil em 2032. O que serve para responder à pergunta “Como se relaciona a previsão do artigo 4º do PL 725 de 2022 com o objetivo de descarbonizar a economia brasileira na prática?” de forma a indicar que o PL em si pode gerar uma definição regulamentar com potencial contraproducente em relação ao objetivo de descarbonização da economia brasileira, considerando a redação atual do artigo 4º do projeto.

Referências

À ESPERA de um Milagre. Direção: Frank Darabont, Produção: David Valdes. Estados Unidos: Warner Bros, 2000.

APÓS 22 dias de apagão no Amapá, distribuidora e governo dizem que rodízio terminou e que energia foi retomada em 100%. *GI*, 24 nov. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/>

ap/amapa/noticia/2020/11/24/amapa-entra-no-22o-dia-de-apagao-com-novo-transformador-ligado-na-subestacao-que-pegou-fogo.ghml. Acesso em: 29 jul. 2022.

BABAYEV, Rafiq; ANDERSSON, Arne; DALMAU, Albert Serra; IM, Hong G.; JOHANSSON, Bengt. Computational comparison of the conventional diesel and hydrogen direct-injection compression-ignition combustion engines. *Fuel*, v. 307, p. 121909, 2022.

BRASIL. *Senado. Projeto de Lei nº 725, de 2022*. Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável. Brasília, DF: 2022. Disponível em: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/152413>. Acesso em: 26 jul. 2022.

BURKE, Andrew. *Assessment of Requirements, Costs, and Benefits of Providing Charging Facilities for Battery-Electric Heavy-Duty Trucks at Safety Roadside Rest Areas*. National Center for Sustainable Transportation (NCST) (UTC), 2022.

DA COSTA SOUTO, Hugo José; NOGUEIRA, Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto. O Hidrogênio Como Vetor Energético do Futuro. *Neutro à Terra*, n. 28, p. 47-53, 2021.

DOUDNA, Jennifer; STERNBERG, Samuel. *A crack in creation: The new power to control evolution*. Random House, 2017.

DOUGLAS, Karen M. COVID-19 conspiracy theories. *Group Processes & Intergroup Relations*, v. 24, n. 2, p. 270-275, 2021.

HANNAN, Mahammad A *et al.* State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. *Ieee Access*, v. 6, p. 19.362-19.378, 2018.

HASSANPOURYOUBAND, Aliakbar; JOONAKI, Edris; EDLMANN, Katriona; HASZELDINE, Stuart. Offshore geological storage of hydrogen: Is this our best option to achieve net-zero?. *ACS Energy Letters*, v. 6, n. 6, p. 2.181-2.186, 2021.

HELLBOY. Direção: Guillermo Del Toro. Produção: Lawrence Gordon, Lloyd Levin, Mike Richardson. Estados Unidos: Sony Pictures Entertainment, 2004.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (ipea). *13. Ação Contra a Mudança Global do Clima*. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html>. Acesso em: 26 jul. 2022.

KOO, Yang-Hyun; YANG, Yong-Sik; SONG, Kun-Woo. Radioactivity release from the Fukushima accident and its consequences: A review. *Progress in Nuclear Energy*, v. 74, p. 61-70, 2014.

KREBS, Tom. Economic consequences of a sudden stop of energy imports: The case of natural gas in Germany. *ZEW-Centre for European Economic Research Discussion Paper*, n. 22-021, 2022.

LI, Hao; SUN, Bo; HAO, Jianjun; ZHAO, Jianguo; LI, Jianchang; KHAKICHI, Aroos. Economical planning of fuel cell vehicle-to-grid integrated green buildings with a new hybrid optimization algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 13, p. 8.514-8.531, 2022.

MALLESWARARAO, K.; ASWIN, N.; KUMAR, Pramod; DUTTA, Pradip; MURTHY, Srinivasa. Experiments on a novel metal hydride cartridge for hydrogen storage and low temperature thermal storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 36, p. 16.144-16.155, 2022.

MCMANUS, Brian James – Real Engineering. *The Truth about Hydrogen*. 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=f7MzFfuNOtY>. Acesso em: 28 jul. 2022.

MEDE, Niels G.; SCHÄFER, Mike S. Science-related populism: Conceptualizing populist demands toward science. *Public Understanding of Science*, v. 29, n. 5, p. 473-491, 2020.

1917. Direção: Sam Mendes. Produção: Brian Oliver, Callum mcdougall, Jayne-ann tenggren, Pippa Harris. Estados Unidos: Universal Pictures, 2020.

NASCIMENTO, Leonardo Breviglieri. *Apagão: mensuração de fatores que impactam o sistema elétrico brasileiro*. 42 f. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Economia) – Insper Instituto de Ensino e Pesquisa, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://repositorio.insper.edu.br/handle/11224/2104>. Acesso em: 28 jul. 2022.

NYKVIST, Björn; OLSSON, Olle. The feasibility of heavy battery electric trucks. *Joule*, v. 5, n. 4, p. 901-913, 2021.

OKOLIE, Jude A.; PATRA, Biswa R.; MUKHERJEE, Alivia; NANDA, Sonil; DALAI, Ajay K.; KOZINSKI, Janusz A. Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, n. 13, p. 8.885-8.905, 2021.

O SENHOR dos Anéis. Direção: Peter Jackson. Produção: New Line Cinema, WingNut Films, Saul Zaentz Film Co. Estados Unidos: New Line Cinema. 2001-2003.

PEREIRA, Natalia; SALES, Ricélia Marinho; SILVA, Samuel Patricio. HIDROGÊNIO (VERDE) E A ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL. *Meio Ambiente (Brasil)*, v. 5, n. 4, 2023.

PIMENTEL, David; PATZEK, Tad W. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural resources research*, v. 14, n. 1, p. 65-76, 2005.

PRĂVĂLIE, Remus; BANDOC, Georgeta. Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications. *Journal of environmental management*, v. 209, p. 81-92, 2018.

RENN, Ortwin. Public responses to the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Psychology*, v. 10, n. 2, p. 151-167, 1990.

XU, Jiamin; ZHANG, Caizhi; WAN, Zhongmin; CHEN, Xi; CHAN, Siew Hwa; TU, Zhengkai. Progress and perspectives of integrated thermal management systems in PEM fuel cell vehicles: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 155, n. 4, p. 1-23, 2022.

XU, Jingjing; CAI, Xingyun; CAI, Songming; CHAO, Yaxin; HU, Chao; LU, Shirong; DING, Shuijiang. High Energy Lithium Ion Batteries: Recent Progress and a Promising Future in Applications. *Energy & Environmental Materials*, v. 6, n. 5, p. e12.450, 2023.

YANG, Zijun; WANG, Bowen; JIAO, Kui. Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China. *Energy*, v. 198, p. 1-9, 2020.