

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VINICIUS NUNES FOLGANES

**A COMPETITIVIDADE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO PARA
SISTEMAS ECONÔMICOS PRODUTIVOS FRENTE AOS RECURSOS
ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS (REDs)**

FLORIANÓPOLIS, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VINICIUS NUNES FOLGANES

**A COMPETITIVIDADE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO PARA
SISTEMAS ECONÔMICOS PRODUTIVOS FRENTE AOS RECURSOS
ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS (REDs)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Everthon Taghori Sica, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2024.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Folganes, Vinicius N.

A COMPETITIVIDADE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO PARA SISTEMAS ECONÔMICOS PRODUTIVOS FRENTE AOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS (REDs) / Vinicius N. Folganes; orientação de Everthon Taghori Sica. - Florianópolis, SC, 2024.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Transição Energética. 2. Hidrogênio. 3. Eficiência Energética. 4. Recursos Energéticos Distribuídos. 5. Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE). I. Taghori Sica, Everthon. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. A COMPETITIVIDADE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO PARA SISTEMAS ECONÔMICOS PRODUTIVOS FRENTE AOS

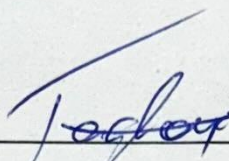
A COMPETITIVIDADE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO PARA SISTEMAS ECONÔMICOS PRODUTIVOS FRENTE AOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS (REDS)

VINICIUS NUNES FOLGANES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

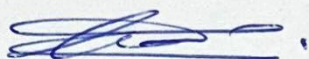
Florianópolis, 6 de setembro, 2024.

Banca Examinadora:



Prof. Everthon Taghori Sica, D. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina



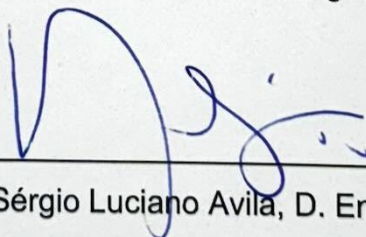
Profª Cláudia Lira, Drª

Instituto Federal de Santa Catarina



Engª Fabíola Sena, D. Eng.

FSET — Consultoria em Energia



Prof. Sérgio Luciano Avila, D. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho ao meu amado pai e aos meus queridos avós, cujo amor e apoio continuam a ecoar eternamente em meu coração e memória.

"Alguns homens vêem as coisas como são, e dizem 'Por quê?' Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo 'Por que não?'- George Bernard Shaw

RESUMO

O avanço industrial acelerado, aliado à latência no desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono, tem contribuído significativamente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa, agravando as mudanças climáticas. Diante da crescente demanda por serviços energéticos e da ininterrupta necessidade de recursos energéticos primários, a sustentabilidade e eficiência desses serviços estão em evidência. Nesse panorama, urge a transição energética em direção à uma economia de baixo carbono, que pressupõe a substituição progressiva de uma de uma infraestrutura energética convencional por alternativas sustentáveis. O hidrogênio, emergindo como recurso e serviço energético alternativo e renovável, desponta com potencial disruptivo. Este trabalho objetiva apresentar indicadores energético-econômicos para avaliar o desempenho do hidrogênio como vetor energético, considerando-o tanto em sistemas produtivos quanto em confronto com outras opções energéticas tradicionais. Propõe-se a formulação de indicadores matemáticos para mensurar a eficácia energética do hidrogênio, incorporando a adaptação do conceito de Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE), entre outros, a este contexto. No entanto, é crucial reconhecer que algumas rotas de produção e uso final do hidrogênio podem levar a emissões de carbono, destacando a necessidade de uma seleção criteriosa das tecnologias empregadas. Como resultado, espera-se que o desenvolvimento de indicadores de avaliação contribuam com análises de performance do hidrogênio, consolidando seu papel tanto como vetor energético como agregador de valor a commodities em que é um dos insumos produtivos.

Palavras-chave: Transição Energética. Hidrogênio. Eficiência Energética. Recursos Energéticos Distribuídos. Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE).

ABSTRACT

The accelerated industrial advancement, coupled with delays in the development of low-carbon technologies, has significantly contributed to the increase in greenhouse gas emissions, exacerbating climate change. Given the growing demand for energy services and the continuous need for primary energy resources, the sustainability and efficiency of these services have come to the forefront. In this context, an urgent energy transition towards a low-carbon economy is necessary, implying the progressive replacement of conventional energy infrastructure with sustainable alternatives. Hydrogen, emerging as an alternative and renewable energy resource and service, shows disruptive potential. This study aims to present energy-economic indicators to evaluate the performance of hydrogen as an energy carrier, considering its role in productive systems and in comparison with other traditional energy options. It proposes the formulation of mathematical indicators to measure the energy efficiency of hydrogen, incorporating the adaptation of the Levelized Cost of Electricity (LCOE) concept, among others, to this context. However, it is crucial to recognize that some production pathways and end uses of hydrogen can lead to carbon emissions, highlighting the need for careful selection of the technologies employed. As a result, it is expected that the development of these evaluation indicators will contribute to performance analyses of hydrogen, solidifying its role as both an energy carrier and a value-added component in commodities where it serves as a productive input.

Keywords: Energy Transition. Hydrogen. Energy Efficiency. Distributed Energy Resources. Levelized Cost of Electricity (LCOE).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto do Evento 1.	35
Figura 2 – Foto do Evento 2.	36
Figura 3 – Foto do Evento 3.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO ₂	Dióxido de Carbono
DRI	<i>Direct Reduced Iron</i> (Redução Direta do Ferro)
EROI	<i>Energy Return on Investment</i> (Retorno Energético sobre o Investimento)
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ V	Hidrogênio Verde
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IRECs	<i>International Renewable Energy Certificate</i> (Certificados Internacionais de Energia Renovável)
LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i> (Custo Normalizado da Eletricidade)
LEVOH	<i>Levelized Energy Vector of Hydrogen</i> (Vetor Energético Nivelado do Hidrogênio)
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i> (Membrana de Troca de Prótons)
PIR	Planejamento Integrado de Recursos Energéticos
RCEs	Reduções Certificadas de Emissões
RECs	<i>Renewable Energy Certificate</i> (Certificados de Energia Renovável)
REDs	Recursos Energéticos Distribuídos
RVM	Reforma a Vapor do Metanol
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i> (Reforma de Metano a Vapor)
TRE	Taxa de Retorno Energético

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Introdução	11
1.2	Justificativa	13
1.3	Definição do Problema	14
1.4	Objetivo Geral	16
1.5	Objetivos Específicos	16
1.6	Estrutura do Trabalho	16
2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
	REFERÊNCIAS	19
	APÊNDICES	21
	APÊNDICE A – ARTIGO XXVII SNPTEE	22
	APÊNDICE B – CERTIFICADOS DE PARTICIPAÇÃO E AUTORIA	32
	APÊNDICE C – PARTICIPAÇÃO NO EVENTO	35
	APÊNDICE D – SLIDES APRESENTADOS NO CONGRESSO	38

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) representa uma etapa essencial na consolidação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso e no desenvolvimento das competências e habilidades que definem o perfil do egresso. Como parte integrante e obrigatória da matriz curricular do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Ensino, Ciência e Tecnologia (IFSC), Câmpus Florianópolis, o TCC tem como objetivo principal a síntese e aplicação prática dos aprendizados obtidos durante a formação acadêmica.

Conforme estabelecido no Projeto Pedagógico do Curso e no Regulamento específico de TCC do Curso de Engenharia Elétrica do IFSC – Câmpus Florianópolis (IFSC, 2012; 2018; 2023), existem três modalidades de TCC permitidas:

1. Elaboração de monografia;
2. Publicação e apresentação de artigo em evento nacional ou internacional relevante para a Engenharia Elétrica; ou
3. Publicação de artigo em periódico nacional ou internacional relevante para a Engenharia Elétrica.

Neste contexto, o presente trabalho adota a segunda modalidade, que envolve a publicação e apresentação de um artigo em evento nacional ou internacional relevante para a Engenharia Elétrica.

Adicionalmente, é importante enfatizar o cumprimento integral dos requisitos obrigatórios estabelecidos nos Regulamentos de TCC do IFSC – Câmpus Florianópolis e do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica. Dentre esses requisitos, destacam-se:

- a conclusão e aprovação na disciplina de TCC-I no primeiro semestre de 2023;
- a submissão do artigo intitulado “A competitividade do Hidrogênio como vetor energético para sistemas econômicos produtivos frente aos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs)” (Apêndice A) para o XXVII SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica);
- a aceitação do artigo pelo congresso em 10 de setembro de 2023, após a conclusão da disciplina de TCC-I;
- a apresentação do artigo no congresso em 28 de novembro de 2023 (Apêndice B); e

- a relevância do congresso para a área de Engenharia Elétrica, validada pelo coordenador do curso e pelo orientador.

Portanto, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) atende a todos os critérios estabelecidos nos regulamentos e diretrizes do IFSC – Câmpus Florianópolis e do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, estando apto para a defesa pública.

É importante ressaltar que o tema abordado neste TCC está intrinsecamente ligado aos desafios contemporâneos enfrentados no campo da Engenharia Elétrica. A expansão constante da população global, em conjunto com o acelerado processo de industrialização em nações emergentes, principalmente na Ásia e na América do Sul, projeta uma constante escalada na demanda global por energia (BALL; WIETSCHEL, 2009). De acordo com estimativas da *International Energy Agency* (IEA), o mundo poderá presenciar um crescimento superior a 50% no consumo de energia até 2030, sendo que os combustíveis fósseis continuam a ser o principal contribuinte para tal demanda (IEA, 2019).

Entretanto, simultaneamente ao supracitado, observa-se a emergência de um consenso global sobre a necessidade urgente de controlar o aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Esse controle é crucial para evitar a indução de alterações climáticas perigosas resultantes da atividade antrópica. Nesse contexto, duas questões críticas surgem para o futuro do setor energético: a segurança energética e a mitigação das mudanças climáticas. A grande questão é estabelecer um equilíbrio entre a minimização das emissões de GEE e a garantia de um suprimento de energia.

Na busca por esse equilíbrio, a transição energética emerge como um processo vital para assegurar a sustentabilidade econômica e ambiental de países ao redor do globo (INETTT, 2021). Com a meta de reduzir as emissões de GEE e ao mesmo tempo garantir a segurança energética, os recursos energéticos primários renováveis e não esgotáveis têm ganhado cada vez mais destaque na matriz energética mundial. Todavia, a implementação desses recursos em larga escala enfrenta desafios, especialmente devido à sua intermitência e à falta de infraestrutura adequada para o armazenamento de energia (TOLMASQUIM, 2016).

Nesse contexto, o hidrogênio emerge como um vetor energético promissor em sistemas econômicos produtivos, visto que proporciona eficiência e baixo impacto ambiental (OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES, 2021). No entanto, a avaliação da performance do hidrogênio como vetor energético ainda não é pacífica. Por um lado, a produção de hidrogênio por recursos energéticos primários renováveis e não esgotáveis ainda é um processo caro e a tecnologia para sua utilização em larga escala ainda está em desenvolvimento em comparação com a produção a partir de recursos fósseis. Por outro lado, os recursos energéticos distribuídos (REDs), como módulos solares (térmico e fotovoltaico) e aerogeradores, têm se mostrado cada vez

mais competitivos em termos de custo e eficiência (THE ECONOMIST, 2022).

Nesse sentido, é necessário avaliar a competitividade do hidrogênio como vetor energético para sistemas econômicos produtivos em comparação com os REDs. Essa avaliação deve envolver diversos aspectos, como os custos de produção, a eficiência energética, a disponibilidade e a flexibilidade do suprimento de energia, a infraestrutura necessária, a segurança e a confiabilidade do fornecimento, assim como os aspectos político-regulatórios relacionados.

Além disso, é importante considerar os desafios relacionados à intermitência dos recursos energéticos primários renováveis e não esgotáveis (TOLMASQUIM, 2016). O armazenamento de energia é essencial para garantir o fornecimento constante de eletricidade a partir desses recursos energéticos, e o hidrogênio pode desempenhar um papel importante nesse processo. No entanto, é necessário avaliar a eficiência do armazenamento de hidrogênio em comparação com outras tecnologias de armazenamento, como baterias (OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES, 2021).

Diversos são desafios relacionados à transição energética (INETTT, 2021), a qual deve para além de tudo, avaliar e identificar as principais oportunidades em diferentes contextos econômicos, sociais e geográficos afim de promover um futuro sustentável, mas sobretudo um futuro possível (THE ECONOMIST, 2022).

1.2 Justificativa

A transição energética envolve uma transformação estrutural e gradual do modo de produção, distribuição e consumo de energia, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE e alcançar a neutralidade de carbono (INETTT, 2021). Nesse contexto, a adoção de fontes de energia de baixo carbono, como o hidrogênio, surgem como uma das estratégias mais promissoras para a consecução de uma transição energética sustentável e eficiente.

O hidrogênio destaca-se não apenas como uma molécula ou *commodity*, mas como um vetor energético capaz de agregar valor às commodities existentes. Sua produção a proveniente de recursos energéticos primários renováveis e não esgotáveis, como a energia solar, eólica e hídrica, e sua ampla gama de aplicações, desde o transporte até a geração de energia elétrica, tornam-no uma opção versátil e eficiente. Esse papel do hidrogênio vai além do armazenamento de energia, posicionando-o como um elemento central na transformação de sistemas produtivos.

A capacidade do hidrogênio de ser produzido de maneira limpa e eficiente, assim como sua utilização em processos industriais e na geração de energia, permite que ele agregue valor aos sistemas econômicos produtivos. Isso inclui a potencial redução de emissões de carbono na produção de aço, vidro e produtos químicos, além de oferecer soluções para o transporte limpo e a cogeração de calor, oxigênio e

eletricidade (ZÜTTEL; BORGSCULTE; SCHLAPBACH, 2008).

Essa mudança de paradigma energético possui o potencial de transformar os sistemas econômicos produtivos e reduzir a dependência de fontes de energia tradicionais e centralizadas (THE ECONOMIST, 2022). Além disso, o hidrogênio, ao ser utilizado como um vetor energético, facilita a integração de diferentes setores energéticos, promovendo uma sinergia que melhora a eficiência geral do sistema.

No entanto, há desafios significativos, especialmente no que diz respeito à produção e utilização eficiente do hidrogênio. Recursos energéticos distribuídos, como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, também desempenham um papel crucial na transição energética, mas enfrentam limitações devido à sua intermitência e variabilidade (TOLMASQUIM, 2016). A capacidade do hidrogênio de atuar como um intermediário, convertendo e transportando energia de maneira eficiente, mitiga esses desafios e contribui para a estabilidade e confiabilidade do sistema energético.

Para avaliar adequadamente a competitividade do hidrogênio como vetor energético em comparação com os recursos energéticos distribuídos, é necessário desenvolver indicadores abrangentes que considerem aspectos técnicos, econômicos, ambientais, entre outros. Esses indicadores fornecerão dados valiosos para a tomada de decisões em políticas públicas e estratégias empresariais, facilitando uma análise precisa dos custos e benefícios do uso do hidrogênio em relação aos recursos energéticos distribuídos, promovendo a transição energética.

1.3 Definição do Problema

O crescimento econômico industrial intensificado, não correspondido pelo desenvolvimento tecnológico de baixo carbono desde a Revolução Industrial, resultou em um acréscimo expressivo na concentração de gases nocivos à atmosfera. Essa concentração tem ocasionado fenômenos associados ao efeito estufa, principal responsável pelo aceleração das mudanças climáticas (RIFKIN, 2011). Além disso, a demanda crescente por serviços energéticos e a necessidade premente de recursos energéticos primários têm contribuído para esse cenário (GLOBAL CARBON PROJECT, 2023).

Todavia, a eficiência energética na utilização final destes serviços não se harmoniza com o desenvolvimento sustentável. Paralelamente, a eficiência na transformação energética desses recursos primários torna-se insustentável quando considerada a discrepância entre a taxa de exploração econômica do recurso primário e a taxa de reposição do estoque de capital natural associado. Assim, face ao crescimento e desenvolvimento econômico, particularmente em países em desenvolvimento, o cenário atual aponta para um rumo divergente ao do desenvolvimento sustentável (ROMEIRO; MAIA, 2011).

Visando suprir a demanda por serviços energéticos que incentivem a tran-

sição energética como opção para uma economia sustentável e de baixo carbono, torna-se necessário considerar aspectos como segurança energética, eficiência, sustentabilidade ambiental e viabilidade político-regulatória. A transição energética pressupõe uma mudança gradual na composição da estrutura de uma fonte primária de energia sob um padrão específico de fornecimento para um novo estado de um sistema de energia (INETTT, 2021). Assim, recursos e serviços energéticos alternativos, não esgotáveis e potencialmente disruptivos, como o de hidrogênio e outros recursos energéticos distribuídos, vêm sendo visados por sua viabilidade e potencial exploratório (OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES, 2021).

Para modificar o cenário delineado pelas condições atuais, torna-se imperativa uma imersão intensa e objetiva na transição energética e suas soluções de baixo carbono. O hidrogênio, bem como outros recursos energéticos distribuídos, tendem a ser elementos-chave para o sucesso da transição energética.

Ademais, a atual tendência indica um aumento nos custos da energia convencional, como a termoeletricidade, em contraste com a redução progressiva nos custos da energia renovável, sugerindo a possível materialização da paridade de rede em grande escala em um futuro próximo. A maior parte desta economia de custos origina-se do aperfeiçoamento das tecnologias de aproveitamento de recursos energéticos primários renováveis e não esgotáveis existentes, assim como do desenvolvimento e comercialização de tecnologias emergentes de segunda e terceira geração, que contribuem igualmente para reduções nos balanços de sistemas e custos de eletrônica de potência (DARLING *et al.*, 2011).

Diversos grupos de interesse monitoram esses desenvolvimentos, sendo a precisão dessas mudanças de elevada importância. Investidores necessitam avaliar o retorno esperado do investimento, enquanto reguladores e formuladores de políticas influenciam a definição da economia da produção de energia e, por isso, requerem informações fidedignas. Financiadores procuram uma forma de analisar o desenvolvimento da tecnologia proposta, e os desenvolvedores de tecnologia buscam entender como podem competir frente a outras tecnologias (DARLING *et al.*, 2011).

Diante desse cenário, surge a necessidade da implementação de indicadores que possibilitem a comparação equitativa da energia ao longo de seu ciclo de vida por diferentes meios. A implantação de indicadores de desempenho energético, surge como uma estratégia fundamental para medir a eficácia desses sistemas (SORREL, 2007). Esses indicadores possibilitam a quantificação do desempenho energético e permitem uma análise comparativa entre diferentes tecnologias, políticas e práticas de gestão energética.

Neste contexto, torna-se importante destacar a crescente relevância do hidrogênio como vetor energético competitivo, sobretudo quando são considerados os

recursos energéticos distribuídos. O hidrogênio possui um potencial significativo para integração em sistemas produtivos e oferece soluções de armazenamento energético de longo prazo, caracterizadas pela sua baixa emissão de carbono (CARMO *et al.*, 2013).

1.4 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como propósito propor a adaptação de indicadores de performance energética, cujo intuito é examinar a competitividade do hidrogênio como vetor energético em sistemas econômicos produtivos em contraste com os recursos energéticos distribuídos.

1.5 Objetivos Específicos

Em alinhamento com o objetivo geral delineado na seção referenciada, esse trabalho pretende atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar o hidrogênio como um vetor energético, avaliando suas características, vantagens e limitações;
- b) estudar o hidrogênio em sua capacidade como recurso energético primário, considerando seu potencial, eficácia e impactos ambientais;
- c) investigar a viabilidade e as implicações do hidrogênio como um serviço energético, especialmente em relação à demanda em sistemas econômicos produtivos;
- d) examinar a estrutura, o funcionamento e os desafios associados à planta de produção de hidrogênio; e
- e) analisar indicadores de performance energética, focando na eficácia e na avaliação do desempenho do hidrogênio como recurso energético.

Cada objetivo específico aqui delineado fornece um foco distinto, mas complementar, contribuindo para uma compreensão abrangente do papel do hidrogênio na transição para uma economia de baixo carbono.

1.6 Estrutura do Trabalho

No capítulo de Introdução, este trabalho inicia-se com uma explanação sobre a fundamentação legal e regulatória que norteia a modalidade específica de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) adotada. São apresentados os requisitos exigidos para este formato de TCC, delineando-se claramente os parâmetros estabelecidos pelas normativas institucionais. Adicionalmente, este capítulo engloba a definição do problema abordado neste trabalho, destacando sua relevância e contextualização

dentro do campo da Engenharia Elétrica. São explicitadas também as motivações que conduziram à escolha deste tema e a justificativa para sua investigação. Além disso, são delineados os objetivos gerais e específicos deste estudo, delineando-se as metas a serem alcançadas.

No Apêndice A, encontra-se o artigo completo resultante desta pesquisa. Este documento engloba de maneira integrada e aprofundada os aspectos teóricos, metodológicos e os principais tópicos da investigação realizada. Para complementar a compreensão do processo de apresentação deste trabalho em um contexto acadêmico, os documentos que comprovam a participação e apresentação do artigo em um congresso são disponibilizados no Apêndice B e C. Esta seção inclui fotografias do evento, certificados de participação e apresentação, fornecendo uma visão mais tangível e completa da divulgação e discussão dos resultados obtidos. Por fim, no Apêndice D, estão os slides utilizados durante a apresentação do artigo no congresso. Estes slides servem como um recurso visual complementar ao artigo, facilitando a compreensão e a comunicação eficaz dos resultados obtidos.

Essa estrutura detalhada tem como objetivo oferecer uma visão abrangente do trabalho realizado, desde sua concepção até sua apresentação e discussão em um contexto acadêmico.

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, conduziu-se uma investigação sobre o papel do hidrogênio como vetor energético, efetuando uma avaliação abrangente baseada em parâmetros energéticos, econômicos e ambientais. O hidrogênio, como foi discutido ao longo do trabalho, manifesta características distintas, divergindo consideravelmente da concepção convencional de uma *commodity*.

A interpretação do hidrogênio, não meramente como uma *commodity*, mas como um produto final ou um fator de produção, provê uma perspectiva econômica: trata-se de um vetor energético que agrega valor a outras commodities. Essa característica se revela fundamental ao avaliar a competitividade do hidrogênio no mercado energético ou como insumo produtivo. Convencionalmente, uma *commodity* é definida como um bem/serviço homogêneo e comercializável que pode ser intercambiado com outros bens/serviços do mesmo tipo, como o petróleo ou o carvão. Contudo, o hidrogênio desafia esta definição tradicional devido à sua cadeia produtiva complexa e à variabilidade do seu valor, dependendo das condições específicas de produção e utilização.

As análises realizadas neste trabalho ressaltam que o hidrogênio pode desempenhar um papel importante na transição para uma economia de baixo carbono. Contudo, essa transição deve ser gerida de forma estratégica e coordenada. Neste processo, as políticas públicas terão uma função primordial, em paralelo com uma colaboração efetiva entre a indústria e a sociedade. Portanto, é essencial que a complexidade da cadeia de valor do hidrogênio seja plenamente compreendida e gerida, visando a promoção de um futuro energético mais sustentável e resiliente.

Para futuras investigações, é recomendado aprofundar a análise do hidrogênio, considerando diferentes cenários geopolíticos e regulatórios, além de explorar novas tecnologias de produção e utilização do hidrogênio que possam surgir. O desafio reside na construção de uma visão integrada e multidisciplinar que possa maximizar o potencial do hidrogênio, ao mesmo tempo que minimiza os riscos e impactos negativos associados.

REFERÊNCIAS

- BALL, M.; WIETSCHEL, M. The future of hydrogen – opportunities and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**, Pergamon, v. 34, p. 615–627, 1 2009. ISSN 0360-3199. 12
- CARMO, M. *et al.* A comprehensive review on PEM water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, Pergamon, v. 38, p. 4901–4934, 4 2013. ISSN 0360-3199. 16
- DARLING, S. B. *et al.* Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics. **Energy & Environmental Science**, The Royal Society of Chemistry, v. 4, p. 3133–3139, 8 2011. ISSN 1754-5706. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2011/ee/c0ee00698j><https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/ee/c0ee00698j>. Acesso em: 10 de mai. 2023. 15
- GLOBAL CARBON PROJECT. **Global Carbon Atlas**. 2023. Disponível em: <https://www.globalcarbonatlas.org/en/content/welcome-carbon-atlas>. Acesso em: 02 fev. 2023. 14
- IEA. **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities**. 2019. 203 p. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf. Acesso em: 10 de mai. 2023. 12
- IFSC, I. F. de S. C. **REGULAMENTO PARA TRABALHOS ACADÊMICOS DO IFSC CÂMPUS FLORIANÓPOLIS: Trabalho de Conclusão de Curso - CCF**. 2018. -19 p. Disponível em: <http://sites.florianopolis.ifsc.edu.br/eletrica/files/2019/01/tcc-regulamento-versao-final.pdf>. 11
- IFSC, I. F. de S. C.; CEPE. **RESOLUÇÃO CEPE/IFSC Nº 74, DE 14 DE SETEMBRO DE 2023**. 2023. -208 p. 11
- IFSC, I. F. de S. C.; CONSUP. **RESOLUÇÃO Nº 27/2012/CS - CONSUP**. 2012. -1 p. Disponível em: http://sites.florianopolis.ifsc.edu.br/eletrica/files/2017/08/CONSUP_resolucao27_2012_aprova_cursos_graduacao_republicada.pdf. 11
- INETTT. **The Net Zero Energy Transition**. 2021. Disponível em: https://www.inettt.org/pdf/INETTT_The-Net-Zero-Energy-Transition.pdf. Acesso em: 10 de mai. 2023. 12, 13, 15
- OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES. **Hydrogen Storage for a Net Zero Carbon Future**. 2021. Disponível em: <https://www.oxfordenergy.org/publications/hydrogen-storage-for-a-net-zero-carbon-future/>. Acesso em: 10 de mai. 2023. 12, 13, 15
- RIFKIN, J. **A terceira revolução industrial: como o poder lateral está transformando a energia, a economia e o mundo**. São Paulo: Editora M. Books, 2011. 14
- ROMEIRO, A. R.; MAIA, A. G. **Avaliação de custos e benefícios ambientais**. Brasília: ENAP, 2011. (Cadernos ENAP, 35). ISSN 0104-7078. 14

SORREL, S. The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. p. 123, 10 2007. Disponível em: <https://tinyurl.com/skb836h9>. Acesso em: 10 de mai. 2023. 15

THE ECONOMIST. **The Economist - 25 June 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.economist.com/weeklyedition/2022-06-25>. Acesso em: 02 fev. 2023. 13, 14

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 452 p. ISBN 978-85-60025-06-0. 12, 13, 14

ZÜTTEL, A.; BORGSCULTE, A.; SCHLAPBACH, L. **Hydrogen as a Future Energy Carrier**. WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, 2008. 0-436 p. ISBN 978-3-527-31474-4. Disponível em: <http://dnb.d-nb.de>. Acesso em: 29 de mai. 2023. 14

APÊNDICES

APÊNDICE A – ARTIGO XXVII SNPTÉE

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO EÓLICA, SOLAR E DEMAIS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS - GES

A COMPETITIVIDADE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO PARA SISTEMAS ECONÔMICOS PRODUTIVOS FRENTE AOS RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS (REDs)

**VINICIUS NUNES FOLGANES (1); EVERTHON TAGHORI SICA (1)
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA - IFSC(1)**

RESUMO

A industrialização descoordenada com tecnologias de baixo carbono intensifica a poluição atmosférica, ampliando o efeito estufa e alterações climáticas. Para alcançar um crescimento sustentável, a transição energética, baseada em segurança energética, eficiência, sustentabilidade ambiental e viabilidade político-regulatória, é fundamental. Este artigo pauta-se na avaliação do hidrogênio como um vetor energético, comparando-o com recursos energéticos distribuídos tradicionais, através de um modelo energético-econômico. Pretende-se desenvolver indicadores para auxiliar na engenharia de performance, considerando o hidrogênio tanto como um recurso energético distribuído quanto um provedor de serviço energético.

PALAVRAS-CHAVE

Transição Energética. Hidrogênio. Eficiência Energética. Recursos Energéticos Distribuídos. Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE).

1.0 INTRODUÇÃO

A expansão acelerada do processo de industrialização, principalmente na Ásia e na América do Sul, projeta uma escalada na demanda global por energia [1]. De acordo com estimativas da *International Energy Agency* (IEA), o mundo poderá presenciar um crescimento superior a 50% no consumo de energia até 2030, sendo que os combustíveis fósseis continuam a ser o principal contribuinte para tal demanda [2]. Todavia, a eficiência energética na utilização final destes serviços não se harmoniza com o desenvolvimento sustentável. A eficiência na transformação energética desses recursos primários torna-se insustentável quando considerada a discrepância entre a taxa de exploração econômica do recurso primário e a taxa de reposição do estoque de capital natural associado. Assim, face ao crescimento e desenvolvimento econômico, particularmente em países em desenvolvimento, o cenário atual aponta para um rumo divergente ao do desenvolvimento sustentável [3].

Destarte, observa-se um consenso global sobre a necessidade de controlar o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse contexto, duas questões críticas surgem para o futuro do setor energético: a segurança do abastecimento energético e a mitigação das mudanças climáticas. O desafio é estabelecer um equilíbrio entre a minimização das emissões de gases de efeito estufa e a garantia de um suprimento de energia adequado para impulsionar o crescimento econômico. Desse modo, a transição energética emerge como um processo vital para assegurar a sustentabilidade econômica e ambiental [4]. Com a meta de reduzir as emissões de GEE e simultaneamente garantir a segurança energética, as fontes renováveis de energia têm cada vez mais destaque na matriz energética. Contudo, a implementação dessas fontes em larga escala enfrenta desafios, especialmente devido à sua intermitência e à falta de infraestrutura adequada para o armazenamento de energia [5].

No bojo da transição energética, o Comércio de Emissões desponta como uma ferramenta, sendo este um mecanismo de mercado, conhecido como *cap-and-trade*, que possibilita a compra ou venda de "permissões" para emitir GEE, incentivando sua redução [6]. Os créditos de carbono, também conhecidos como Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), representam uma redução quantificável de emissões de GEE e são gerados por projetos que diminuem ou sequestram essas emissões [7]. Esses créditos podem ser vendidos no mercado de carbono, oferecendo incentivos financeiros para iniciativas de baixo carbono e proporcionando uma maneira para empresas e governos compensarem suas próprias emissões. Ainda no espectro do Comércio de Emissões, os Certificados Internacionais de Energia Renovável (IRECs) e os Certificados de Energia Renovável (RECs) validam que uma quantidade específica de energia que foi gerada a partir de fontes renováveis e facilitam o comércio dessa energia, impulsionando o investimento em novas instalações de energia renovável [8].

Nesse cenário, o hidrogênio verde (H2V) assume uma importância significativa. O H2V é produzido a partir de energia renovável e pode ser certificado, fomentando um mercado para IRECs e RECs baseados em hidrogênio. Isso poderia

estimular ainda mais a produção de H₂V, tornando-o competitivo em relação à produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis [9]. Ademais, a atual tendência indica um aumento nos custos da energia convencional, como a termoeletricidade, em contraste com a redução progressiva nos custos da energia renovável, sugerindo a possível materialização da paridade de rede em grande escala em um futuro próximo. A maior parte desta economia de custos origina-se do aperfeiçoamento das tecnologias existentes, assim como do desenvolvimento e comercialização de tecnologias emergentes de segunda e terceira geração. [10].

Nesse contexto, o hidrogênio emerge como um vetor energético promissor em sistemas econômicos produtivos, visto que proporciona alta eficiência e baixo impacto ambiental [11]. No entanto, a avaliação da performance do hidrogênio como vetor energético ainda não é pacífica. Por um lado, a produção de hidrogênio por fontes renováveis ainda é um processo caro e a tecnologia para sua utilização em larga escala ainda está em desenvolvimento em comparação com a produção a partir de combustíveis fósseis. Por outro lado, os recursos energéticos distribuídos (REDs), como painéis solares e turbinas eólicas, têm se mostrado cada vez mais competitivos em termos de custo e eficiência [12]. Diversos grupos de interesse monitoram esses desenvolvimentos tecnológicos para produção de hidrogênio. Investidores necessitam avaliar o retorno esperado do investimento, enquanto reguladores e formuladores de políticas influenciam a economia da produção de energia. Financiadores procuram uma forma de analisar o desenvolvimento da tecnologia, e os desenvolvedores de tecnologia buscam entender como podem competir frente a outras tecnologias [10].

Diante disso, é necessária a implementação de indicadores que possibilitem a comparação equitativa dos custos de energia ao longo de seu ciclo de vida por diferentes meios e a quantificação do desempenho energético permite uma análise comparativa entre diferentes tecnologias, políticas e práticas de gestão energética. A implantação de indicadores de desempenho energético, surge como uma estratégia para medir a eficácia [13].

2.0 ACOPLAMENTO SETORIAL E PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS ENERGÉTICOS

A exploração econômica dos recursos energéticos renováveis é definida pela taxa de conversão da energia primária (solar ou eólica) em energia útil (eletricidade ou calor), a qual tem melhorado continuamente com o avanço da tecnologia e da economia de escala [14]. No entanto, a taxa de recomposição do estoque de capital natural para as fontes solar e eólica são inesgotáveis em contraponto a taxa de recomposição para os combustíveis fósseis, que é efetivamente nula numa escala de tempo humana [15]. Essas fontes renováveis ao alimentarem eletrolisadores proporcionam a produção de H₂V. À medida que o hidrogênio verde se incorpora a matriz energética, a competitividade e a sustentabilidade dos sistemas econômicos produtivos são robustecidas, marcando a ascensão à economia de baixo carbono [16].

Em paralelo, a eficiência energética contribui com a transição energética por meio da substituição de equipamentos obsoletos por opções mais eficientes em termos energéticos, da instalação de sistemas de controle de energia e da implementação de práticas de gestão de energia eficientes. Entretanto, um desafio que surge no contexto da eficiência energética é o Paradoxo de Jevons. Esse paradoxo sugere que à medida que a eficiência energética aumenta, o consumo de energia também pode aumentar. Isso ocorre porque a melhoria da eficiência torna o uso da energia mais econômico, levando a um aumento na demanda [15]. Essa teoria é particularmente relevante para o hidrogênio como vetor energético. À medida que a eficiência na produção, armazenamento e uso do hidrogênio melhora, e a paridade de rede é alcançada. No entanto, isso também pode resultar em um aumento no consumo de energia, à medida que a demanda por hidrogênio aumenta [17].

Um elemento fundamental da transição energética é o acoplamento de todos os setores energéticos - eletricidade, calor, transporte e indústria. O hidrogênio é um exemplo de como o acoplamento setorial pode funcionar, pois pode ser produzido a partir de energia elétrica renovável (através da eletrólise da água), usado para armazenar energia ou convertido novamente em eletricidade, ou mesmo usado como combustível em diversos setores, incluindo transporte e indústria. E, desse modo, sendo uma espécie de "ponte" entre diferentes setores energéticos, facilitando a integração e otimização de recursos energéticos [18]. Conquanto, a transição energética também envolve uma mudança no escopo do planejamento dos recursos energéticos. Assim, o Planejamento Integrado de Recursos Energéticos (PIR) emerge como uma abordagem promissora que busca otimizar o uso de recursos energéticos ao considerar todas as fontes de energia disponíveis e os meios para usar essa energia de forma mais eficiente. O PIR também implica uma maior participação dos consumidores no sistema energético. Isso pode ser alcançado por meio de uma gama de medidas, desde a tarifação dinâmica que incentiva os consumidores a ajustar o seu consumo de energia à produção de energia renovável, até a produção de energia descentralizada por meio de sistemas de energia solar ou veículos elétricos [19].

2.1 Recursos Energéticos Distribuídos (REDs)

Essencialmente, REDs são recursos de pequena escala, instalados próximo ao ponto de consumo, capazes de fornecer energia elétrica e compreendem uma ampla gama de tecnologias, incluindo a geração distribuída, armazenamento de energia, resposta à demanda e veículos elétricos [20]. O uso desses recursos traz benefícios

significativos, como redução de perdas de transmissão e distribuição, aumento da eficiência energética, melhoria da resiliência e flexibilidade do sistema e redução das emissões de GEE [21]. Este é um meio que favorece a competitividade do hidrogênio como vetor energético, uma vez que a produção de hidrogênio pode ser diretamente integrada em um sistema de energia distribuído, funcionando como uma forma de armazenamento de energia renovável, além de permitir a cogeração de calor e eletricidade [22].

O monitoramento integrado e inteligente, alicerçado em técnicas de otimização, emerge como avanço na gestão dos REDs, impulsionando a eficiência energética e a estabilidade do sistema [23]. Isso tem implicação direta nos REDs onde o hidrogênio desponta, pois sua produção pode ocorrer diretamente no local de geração de energia, um aspecto útil quando a fonte é intermitente, como a energia solar ou eólica. O hidrogênio, assim produzido, pode ser armazenado e, posteriormente, utilizado como insumo e agregador de valor para *commodities* ou mesmo para geração de eletricidade em períodos de demanda elevada ou baixa produção para responder de forma eficiente às flutuações na demanda de energia. A utilidade do hidrogênio abrange o setor de transporte, onde pode funcionar como uma opção de armazenamento de energia para veículos elétricos, tanto para carregamento direto quanto para reconversão em eletricidade através de células a combustível [24]. Desse modo, a simbiose do hidrogênio com os REDs é oportunidade para otimizar os processos de geração, distribuição e consumo de energia e contribuir para um sistema energético mais sustentável, resiliente e eficiente.

3.0 HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO

Um vetor energético atua como agente de transferência de energia, um intermediário que permite a conversão, armazenamento e transporte de energia a partir de uma fonte primária. Isto torna a energia mais acessível para uma diversidade de aplicações [25]. Nesse sentido, o hidrogênio se destaca, em virtude da sua alta densidade gravimétrica de energia, abundância e versatilidade [26]. Adicionalmente, o hidrogênio possui uma ampla variedade de categorizações, tais como "verde", "azul" e "cinza", cada uma refletindo os diferentes métodos de produção e as respectivas implicações ambientais [16]. O hidrogênio cinza, a forma atualmente, é gerado a partir de combustíveis fósseis, predominantemente o gás natural, por meio de um processo chamado reforma de vapor de metano (SMR). Esse processo libera grandes quantidades de CO₂ na atmosfera, contribuindo para o aumento das emissões de GEE. O hidrogênio azul é produzido através do mesmo processo que o hidrogênio cinza, com a diferença que o CO₂ gerado é capturado e armazenado ou utilizado. Embora esse último processo seja mais limpo, ainda está intrinsecamente ligado à exploração de combustíveis fósseis [27]. Por sua vez, o hidrogênio verde é produzido pela eletrólise da água, um processo alimentado por fontes de energia renovável, como energia solar ou eólica [27].

No entanto, a produção de H₂V enfrenta desafios como a intermitência das fontes de energia renovável. Como a energia solar e eólica não estão disponíveis continuamente, a produção de H₂V pode sofrer flutuações. Além disso, os eletrolisadores PEM (Membrana de Troca de Prótons), comumente usados na produção de H₂V, requerem que pelo menos 30% da capacidade de carga seja mantida para garantir a integridade do sistema e a eficiência do processo [28].

3.1 O uso industrial do hidrogênio

No setor industrial, o hidrogênio é amplamente utilizado na produção de amônia e no refino de petróleo [29]. Além disso, o hidrogênio tem encontrado aplicações na geração de energia elétrica por meio de células de combustível e como um meio de armazenar energia excedente de fontes renováveis. Atualmente, mais de metade do hidrogênio produzido globalmente é usada na indústria petroquímica, principalmente para a hidrogenação de óleos insaturados e a produção de amônia através do processo *Haber-Bosch*, fundamental para produção de fertilizantes [1]. Estima-se que a produção de amônia represente cerca de 1-2% do consumo mundial de energia [33].

As indústrias de aço e vidro estão explorando o uso do hidrogênio como uma alternativa para reduzir as emissões de CO₂, pois às produções tradicionais requerem carvão como fonte energética. Na indústria automotiva, o hidrogênio é alçado como fonte de energia para veículos movidos a células de combustível [30]. O hidrogênio pode ser utilizado para reduzir o minério de ferro, em um processo conhecido como *Direct Reduced Iron* (DRI), formando assim o chamado aço verde (*Green Steel*), porém esse método está em teste de escala industrial [31]. Na fabricação de vidro, grandes quantidades de calor são necessárias para fundir os materiais. Atualmente, este calor é geralmente fornecido por combustíveis fósseis, que resultam em emissões de CO₂, mas o hidrogênio poderia ser uma alternativa a estes combustíveis..

3.2 Possível economia de escopo com a produção de hidrogênio

A economia de escopo, conceito introduzido por [32], refere-se à redução de custos resultante da produção conjunta de diferentes produtos em uma mesma instalação. Ao contrário da economia de escala, que está pautada na produção em massa de um único produto, a economia de escopo busca otimizar a produção ao diversificar os produtos e serviços gerados por uma única instalação ou processo [33]. A produção de hidrogênio pode ser enquadrada nesse conceito de economia de escopo, principalmente ao considerar sistemas de cogeração e híbridos.

Um exemplo é a integração de sistemas de cogeração, nos quais os subprodutos, oxigênio e calor, residuais gerados no processo de produção de hidrogênio podem ser aproveitados para outros processos industriais. Os sistemas híbridos, por sua vez, representam a união de diferentes tecnologias de produção de energia em uma única instalação, visando melhorar a eficiência e a confiabilidade geral do sistema [34]. Na produção de hidrogênio, a integração de tecnologias de eletrólise alimentadas por energia renovável, por exemplo, pode reduzir os custos de produção e as emissões de carbono..

Existem várias rotas tecnológicas para a produção de hidrogênio, cada uma com características específicas e implicações, contudo os quatro métodos principais são: Reforma a Vapor do Metanol, Reforma de Metano a Vapor (SMR), decomposição catalítica de amônia e eletrólise. A Reforma a Vapor do Metanol é uma técnica que produz hidrogênio através da reação do metanol com a água, na presença de um catalisador. Sua eficiência e a ampla disponibilidade do metanol tornam esse método atraente. No entanto, é importante considerar que a pegada de carbono do hidrogênio produzido por RVM é profundamente influenciada pela origem do metanol e pelo tratamento do CO₂ gerado durante o processo [35].

A Reforma de Metano a Vapor (SMR) é a principal rota para a produção de hidrogênio em larga escala, onde o metano reage com a água sob altas temperaturas para produzir hidrogênio e dióxido de carbono. Apesar de sua eficiência, as altas emissões de CO₂ decorrentes deste processo têm sido objeto de críticas, apontando a necessidade de combinação com tecnologias de sequestro e armazenamento de carbono [36]. A Decomposição Catalítica de Amônia é um método que apresenta baixas emissões de carbono e consiste na decomposição da amônia em hidrogênio e nitrogênio, na presença de um catalisador [37]. A eletrólise, que consiste na divisão da água em hidrogênio e oxigênio por meio de uma corrente elétrica, tem potencial para ser um método completamente neutro em carbono se a eletricidade utilizada for obtida de fontes renováveis. Esse método é particularmente adequado para a integração com fontes de energia renovável intermitentes, como a solar e a eólica, no entanto, o seu principal desafio reside em sua eficiência energética e custos associados [28].

Compreender as nuances técnicas e econômicas desses processos propicia uma perspectiva sobre a viabilidade e impacto do hidrogênio como uma fonte de energia, sendo particularmente importante considerar o hidrogênio não só como um recurso energético, mas também como um vetor energético. A medida de performance energética do hidrogênio e sua avaliação por meio de indicadores específicos permitem uma análise mais matizada sobre o seu papel na matriz energética do futuro.

4.0 AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO

Um método que permite a comparação dos custos de energia produzidos por diferentes meios é o *Levelized Cost of Electricity* (Custo Normalizado de Energia, LCOE), um indicador para a análise comparativa de custos energéticos [10]. No entanto, a inserção de valores imprecisos de LCOE pode resultar não apenas em decisões subótimas para um projeto específico, mas também desorientar as iniciativas de políticas energéticas em escala local e global [38]. Dada essa consideração, torna-se evidente que o LCOE não deve ser avaliado isoladamente, mas considerado em conjunto com outras métricas, oferecendo assim uma perspectiva mais equilibrada e completa. A implementação de indicadores de desempenho energético, além do LCOE, desponta como uma estratégia fundamental para aferir a eficácia e possibilitando uma análise comparativa entre diferentes tecnologias, políticas e práticas de gestão energética [13].

4.1 Método LCOE

O *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), representando o custo médio por unidade de energia gerada ao longo da vida útil de um sistema de geração de energia, incorpora tanto os custos de capital quanto os custos operacionais. Isso permite uma comparação equitativa entre diferentes tecnologias e fontes de energia, tornando-a especialmente pertinente para a análise da eficácia dos sistemas de energia renovável [39]. O LCOE propicia a avaliação dos custos das tecnologias de energia renovável em relação aos preços de energia da rede, sendo possível determinar se a paridade de rede foi atingida: a paridade é reconhecida quando o LCOE é igual ou menor que o preço atual da energia. Quando esse equilíbrio é alcançado, as respectivas tecnologias são consideradas viáveis comercialmente, levando à suposição de que não necessitam mais de subsídios [40]. Usualmente o LCOE é obtido conforme a equação (1).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n (I_t + M_t + F_t)}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

Em que: I_t é o investimento e as despesas do ano t ; M_t são os custos de manutenção e operação no ano t ; F_t são as despesas com combustível no ano t ; E_t é a energia elétrica gerada no ano t ; r é a taxa de desconto e n é a vida útil esperada do sistema.

Em adaptação, para comprar a competitividade do processo de produção do hidrogênio, sobretudo o H2V, com relação aos REDs com base de uma taxa livre de juros, propõe-se o uso de variáveis de dimensões energéticas como o proposto na equação (2).

$$LEVOH = \frac{\sum_{t=1}^n (Ei_t + Ai_t) * \eta}{\sum_{t=1}^n \frac{H_t + O_t - Cr_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

Em que: Ei_t é energia elétrica injetada no ano t ; Ai_t é a água injetada no ano t ; η é o rendimento percentual do processo; H_t é o hidrogênio resultante do processo no ano t ; O_t é o oxigênio resultante do processo no ano t ; C_r é o calor residual do processo no ano t ; r é a taxa de aproveitamento do Oxigênio como vetor resultante e n é a vida útil esperada do sistema.

Este método é particularmente relevante no contexto das energias renováveis, uma vez que estas tecnologias tendem a custos de capital mais elevados, mas custos operacionais mais baixos em comparação com as tecnologias convencionais baseadas em combustíveis fósseis [38]. Isso torna o LCOE uma métrica adequada para avaliar a competitividade do hidrogênio como vetor energético, especialmente o H2V [22].

4.2 Método EROI

O *Energy Return on Investment* (EROI), equação (3), é um indicador de eficiência energética para avaliar a viabilidade de diferentes fontes de energia [41]. Esse método representa a razão entre a quantidade de energia obtida a partir de uma determinada fonte e a quantidade de energia consumida para extrair essa energia, ou seja, uma medida do balanço energético líquido de um sistema de geração de energia.

$$EROI = \sum_{t=1}^n \frac{Eout_t}{Ein_t} \quad (3)$$

Em que: $Eout_t$ é energia resultante produzida no ano t e Ein_t é a energia necessária para produzir.

Para as energias renováveis e o hidrogênio, o EROI pode ter balanço energético líquido mais baixo em comparação com as tecnologias baseadas em combustíveis fósseis, devido à energia requerida para a produção e armazenamento do hidrogênio [42]. No entanto, à medida que as tecnologias de produção de hidrogênio se tornam mais eficientes e a infraestrutura de armazenamento e distribuição de hidrogênio se expande, espera-se que o EROI do hidrogênio melhore [43]. Dessa forma, propõem-se uma formulação conforme (4).

$$EROI = \sum_{t=1}^n \frac{(H_t + O_t)}{(Ei_t + Ai_t)} \quad (4)$$

Em que: Ei_t é energia elétrica injetada no ano t ; Ai_t é a água injetada no ano t ; H_t é o hidrogênio resultante do processo no ano t ; O_t é o oxigênio resultante do processo no ano t .

4.3 Método TRE

A Taxa de Retorno Energético (TRE) é uma métrica para avaliar a eficiência de uma fonte de energia em termos de energia útil obtida em relação à energia despendida para obter essa energia [44]. No contexto da produção do hidrogênio, o TRE é particularmente relevante, pois a produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio podem ser energeticamente intensivos, dependendo da tecnologia utilizada [45]. Por exemplo, a produção de hidrogênio através da eletrólise da água requer uma quantidade significativa de energia elétrica e de recursos hídricos, que deve ser considerada no cálculo do TRE para avaliar a eficiência geral do sistema.

$$TRE = \sum_{t=1}^n \frac{Edisp_t}{Einv_t} \quad (5)$$

Em que: $Edisp_t$ é Energia Total Disponível no ano t e $Einv_t$ é a Energia Investida.

4.4 Método da Contabilidade Energética

A Contabilidade Energética é um método analítico para quantificar e rastrear os fluxos e conversões de energia em um sistema econômico [46]. Este método permite considerar todas as entradas e saídas de energia, sendo possível identificar os custos energéticos reais associados a diferentes fontes e tecnologias de energia. No contexto do hidrogênio, a contabilidade energética pode fornecer *insights* valiosos sobre a eficiência e a sustentabilidade da

produção e utilização do hidrogênio. Por exemplo, pode ajudar a determinar a quantidade de energia necessária para produzir hidrogênio por meio de diferentes rotas tecnológicas (como eletrólise ou reforma a vapor) ou de energia recuperada quando o hidrogênio é usado em uma célula a combustível [47].

4.5 Considerações sobre a performance energética

A análise competitividade do hidrogênio como vetor energético, em comparação com os recursos energéticos distribuídos (REDs) tradicionais - como energia solar fotovoltaica, eólica e sistemas de armazenamento de baterias - demanda uma comparação padronizada, para tanto propõem-se a unidade de energia Joule (J). Ademais, é essencial considerar a dinamicidade na adaptação das variáveis para a unidade Joules. Isso inclui reconhecer a necessidade de contabilizar as mudanças temporais e espaciais tanto nas fontes de energia quanto na demanda energética. Esta consideração é especialmente significativa para os recursos energéticos distribuídos (REDs), que são intrinsecamente caracterizados pela sua variabilidade e distribuição. Já, para o hidrogênio deve-se considerar a densidade energética e a dinâmica das variáveis associadas, uma vez que ambas têm implicações significativas para a eficiência, a infraestrutura necessária e a aceitação pelo mercado.

A densidade gravimétrica de energia, muitas vezes também chamada de densidade energética, é um parâmetro que define a quantidade de energia armazenada por unidade de massa, ou seja, a energia que pode ser obtida a partir de um determinado peso de uma substância ou material. Essa medida é extremamente importante na comparação de diferentes vetores de energia, como combustíveis fósseis, baterias, capacitores e, é claro, o hidrogênio. Por exemplo, enquanto o hidrogênio tem a maior densidade energética gravimétrica de qualquer combustível (cerca de 141 MJ/kg), sua densidade energética volumétrica é muito baixa em condições normais de temperatura e pressão, acarretando muito espaço para armazenar uma quantidade útil de energia em forma de hidrogênio [48], [49]. Quando se avalia o oxigênio, observa-se uma densidade energética gravimétrica em torno de 15 MJ/kg, cerca de 10 vezes menor que a do hidrogênio [50]. A água é um insumo fundamental para o processo de produção de hidrogênio, pois é tanto um subproduto da combustão de hidrogênio (juntamente com energia) quanto uma fonte de hidrogênio através da eletrólise. No entanto, a eletrólise requer uma quantidade significativa de energia elétrica, o que pode tornar o processo menos eficiente. O calor, por outro lado, é tanto um subproduto da produção de hidrogênio, podendo ser aproveitado ou não no processo de transformação do hidrogênio em um processo de economia de escopo.

Ademais, pode-se considerar a entalpia como uma propriedade termodinâmica fundamental amplamente utilizada no estudo de processos energéticos, como as reações químicas que ocorrem na geração de energia, sendo o uso desta essencial no processo de análise do valor energético relacionado ao hidrogênio, pois possui não linearidade dependendo da pressão e da temperatura para produção de hidrogênio, conforme Figura 1.

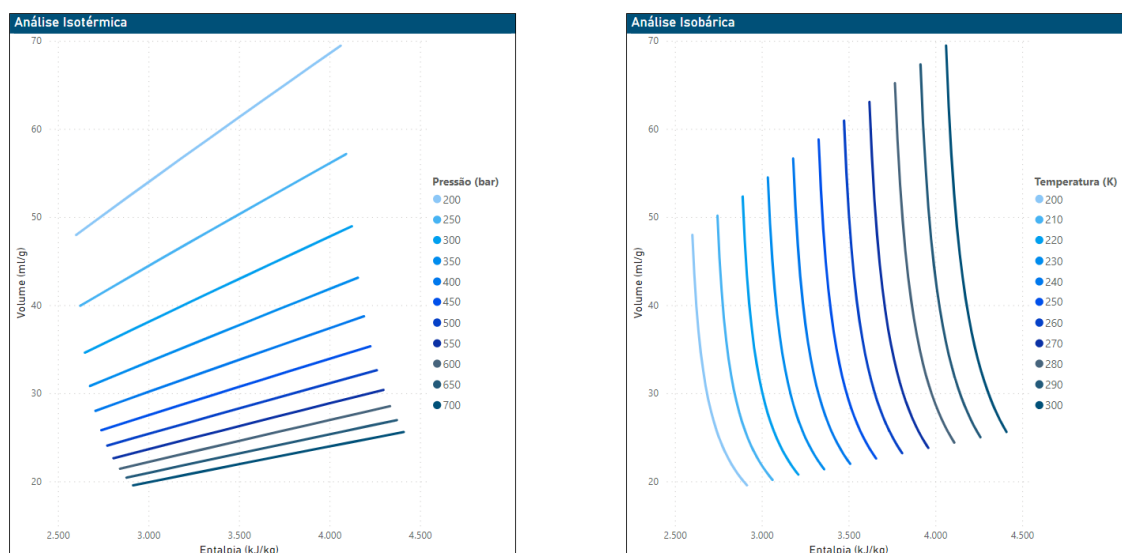


Figura 1 – (a) Análise Isotérmica do Hidrogênio e (b) Análise Isobárica do Hidrogênio, adaptado de [51]

No caso da eletrólise da água para produzir hidrogênio, a entalpia de reação é positiva, significando que a reação absorve energia do ambiente. Essa energia é armazenada como energia potencial química no hidrogênio produzido e pode ser liberada através da combustão do hidrogênio. Já, a reação de combustão do hidrogênio tem uma entalpia de reação negativa, significando que a energia é liberada.

Portanto, a entalpia é crucial na avaliação da eficiência energética e densidade energética de processos que envolvem hidrogênio. Para a produção eficiente de hidrogênio, processos com baixa entalpia de reação (ou seja, que

requerem menos energia para ocorrer) são preferíveis, enquanto para a geração de energia, processos com alta entalpia de reação (ou seja, que liberam mais energia) são desejados. Na Figura 1 (a) e (b) temos a análise da entalpia do Hidrogênio em diferentes condições de volume, temperatura e pressão [51]. Sendo essas, informações cruciais para a definição do valor energético presente do hidrogênio devido ao seu estado no momento de análise. O mesmo deve ser efetuado para a análise do valor energético presente do oxigênio e da água.

5.0 CONCLUSÃO

Neste estudo, conduziu-se uma investigação sobre o papel do hidrogênio como vetor energético, efetuando uma avaliação abrangente baseada em parâmetros energéticos, econômicos e ambientais. O hidrogênio, como foi discutido ao longo do artigo, manifesta características distintas, divergindo consideravelmente da concepção convencional de uma commodity.

A interpretação do hidrogênio, não meramente como uma commodity, mas como um produto final ou um fator de produção, provê uma perspectiva econômica: trata-se de um vetor energético que agrega valor a outras commodities. Essa característica se revela fundamental ao avaliar a competitividade do hidrogênio no mercado energético ou como insumo produtivo. Convencionalmente, uma commodity é definida como um bem homogêneo e comercializável que pode ser intercambiado com outros bens do mesmo tipo, como o petróleo ou o carvão [52]. Contudo, o hidrogênio desafia esta definição tradicional devido à sua cadeia produtiva complexa e à variabilidade do seu valor, dependendo das condições específicas de produção e utilização.

No campo da análise econômica, a avaliação do comportamento de indivíduos e empresas é um passo imprescindível para entender a posição do hidrogênio como um produto agregado. O conceito de produto agregado, que se aplica a bens cujo valor deriva não somente do produto em si, mas também de fatores adicionais, como processos de produção, transporte e armazenamento [53], se torna particularmente relevante no caso do hidrogênio. Nesse contexto, tais fatores adicionais adquirem destaque, visto que a produção de hidrogênio verde (derivado de fontes renováveis) ou azul (originado a partir de gás natural com captura de carbono) pode conferir um valor agregado notável no contexto de redução de emissões de carbono.

As análises realizadas neste trabalho ressaltam que o hidrogênio pode desempenhar um papel importante na transição para uma economia de baixo carbono. Contudo, essa transição deve ser gerida de forma estratégica e coordenada. Neste processo, as políticas públicas terão uma função primordial, em paralelo com uma colaboração efetiva entre a indústria e a sociedade. Portanto, é essencial que a complexidade da cadeia de valor do hidrogênio seja plenamente compreendida e gerida, visando a promoção de um futuro energético mais sustentável e resiliente.

Para futuras investigações, é recomendado aprofundar a análise do hidrogênio, considerando diferentes cenários geopolíticos e regulatórios, além de explorar novas tecnologias de produção e utilização do hidrogênio que possam surgir. O desafio reside na construção de uma visão integrada que possa maximizar o potencial do hidrogênio, ao mesmo tempo que minimiza os riscos e impactos negativos associados.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Ball e M. Wietschel, “The future of hydrogen – opportunities and challenges”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 34, nº 2, p. 615–627, jan. 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.11.014.
- [2] International Energy Agency, “The Future of Hydrogen: Seizing today’s opportunities”, Paris, jun. 2019. Acessado: 16 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf
- [3] A. R. Romeiro e A. G. Maia, *Avaliação de custos e benefícios ambientais*, nº 35. em Cadernos ENAP. Brasília: ENAP, 2011.
- [4] INETTT, “The Net Zero Energy Transition”. 2021. Acessado: 16 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: https://www.inett.org/pdf/INETTT_The-Net-Zero-Energy-Transition.pdf
- [5] M. T. Tolmasquim, *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- [6] R. N. Stavins, “What Can We Learn from the Grand Policy Experiment? Lessons from SO2 Allowance Trading”, *Journal of Economic Perspectives*, vol. 12, nº 3, p. 69–88, set. 1998, doi: 10.1257/jep.12.3.69.
- [7] J. P. N. Barros, “Reduções Certificadas de Emissões (RCES): Tratamento Jurídico e Regulação no Mercado de Capitais”, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, Brazil, 2011. doi: 10.17771/PUCRIO.ACAD.19432.
- [8] M. Ragwitz *et al.*, *Assessment and optimisation of renewable energy support schemes in the European electricity market*. OPTRES, 2007.
- [9] J. H. P. de Azevedo, “Manual para Certificação de Hidrogênio”, dez. 2022.
- [10] S. B. Darling, F. You, T. Veselka, e A. Velosa, “Assumptions and the levelized cost of energy for fotovoltaics”, *Energy Environ Sci*, vol. 4, nº 9, p. 3133–3139, ago. 2011, doi: 10.1039/C0EE00698J.
- [11] OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES, “Hydrogen Storage for a Net Zero Carbon Future”, 2021. Acessado: 16 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.oxfordenergy.org/publications/hydrogen-storage-for-a-net-zero-carbon-future>

- [12] THE ECONOMIST, “The Economist - 25 June 2022”. 2022. Acessado: 16 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.economist.com/weeklyedition/2022-06-25>
- [13] S. Sorrell, “The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency”, Sussex, out. 2007. Acessado: 16 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <https://d2e1qxpsswcpgz.cloudfront.net/uploads/2020/03/the-rebound-effect-an-assessment-of-the-evidence-for-economy-wide-energy-savings-from-improved-energy-efficiency.pdf>
- [14] J. Creyts, A. Derkach, S. Nyquist, K. Ostrowski, e J. Stephenson, “US greenhouse gas emissions: How much at what cost?”, dez. 2007. Acessado: 20 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/reducing-us-greenhouse-gas-emissions>
- [15] S. Sorrell, “Jevons’ Paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency”, *Energy Policy*, vol. 37, nº 4, p. 1456–1469, abr. 2009, doi: 10.1016/J.ENPOL.2008.12.003.
- [16] I. Staffell *et al.*, “The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system”, *Energy Environ Sci*, vol. 12, nº 2, p. 463–491, fev. 2019, doi: 10.1039/C8EE01157E.
- [17] C. Breyer e A. Gerlach, “Global overview on grid-parity”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, nº 1, p. 121–136, 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.1254>.
- [18] D. Gielen, E. Taibi, e R. Miranda, “Hydrogen: A renewable energy perspective”, Abu Dhabi, 2019. Acessado: 20 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: www.irena.org
- [19] G. V. Machado *et al.*, “Experiência Internacional com Tarifas Dinâmicas de Eletricidade”, Brasília, dez. 2021. Acessado: 20 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/>
- [20] F. Sena, “Fatores chave para a implementação de REDs no Brasil”, *LEFOSSE Advogados*, 2021. <https://media-exp1.licdn.com/dms/document/C4D1FAQGm6cMlvN9TXA/feedshare-document-pdf-analyzed/0/1625603730212?e=1630519200&v=beta&t=s9VAIL-60d8Rh6h5a8IxNP8NCFJzJyckPXZZ5UQOQ> (acessado 30 de agosto de 2021).
- [21] Y. Parag e B. K. Sovacool, “Electricity market design for the prosumer era”, *Nat Energy*, vol. 1, nº 4, mar. 2016, doi: 10.1038/NENERGY.2016.32.
- [22] O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson, e S. Few, “Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 42, nº 52, p. 30470–30492, dez. 2017, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2017.10.045.
- [23] B. Li, C. Wan, K. Yuan, e Y. Song, “Demand Response for Integrating Distributed Energy Resources in Transactive Energy System”, *Energy Procedia*, vol. 158, p. 6645–6651, fev. 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2019.01.040.
- [24] M. van der Spek *et al.*, “Perspective on the hydrogen economy as a pathway to reach net-zero CO2 emissions in Europe”, *Energy Environ Sci*, vol. 15, nº 3, p. 1034–1077, 2022, doi: 10.1039/D1EE02118D.
- [25] A. Züttel, A. Borgsculte, e L. Schlapbach, *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. Acessado: 24 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <http://dnb.d-nb.de>
- [26] L. Schlapbach e A. Züttel, “Hydrogen-storage materials for mobile applications”, *Nature*, vol. 414, p. 353–358, maio 2001, doi: 10.1038/35104634.
- [27] World Economic Forum, “Grey, blue, green – the many colours of hydrogen explained”, *World Economic Forum*, 27 de julho de 2021. <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/> (acessado 8 de junho de 2023).
- [28] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, e D. Stolten, “A comprehensive review on PEM water electrolysis”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 38, nº 12, p. 4901–4934, abr. 2013, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2013.01.151.
- [29] S. J. Davis *et al.*, “Net-zero emissions energy systems”, *Science (1979)*, vol. 360, nº 6396, p. eaas9793, 2018, doi: 10.1126/science.aas9793.
- [30] K. Zeng e D. Zhang, “Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications”, *Prog Energy Combust Sci*, vol. 36, nº 3, p. 307–326, jun. 2010, doi: 10.1016/J.PECS.2009.11.002.
- [31] A. Carpenter, “CO 2 abatement in the iron and steel industry”, *IEA Clean Coal Centre*, p. 119, jan. 2012.
- [32] J. C. Panzar e R. Willig, “Economies of Scale in Multi-Output Production”, *Q J Econ*, vol. 91, nº 3, p. 481–493, 1977, [Online]. Disponível em: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:oup:qjecon:v:91:y:1977:i:3:p:481-493>.
- [33] C. Szwarcfiter e P. R. T. Dalcól, “Economias de escala e de escopo: desmistificando alguns aspectos da transição”, *Associação Brasileira de Engenharia de Produção*, vol. 7, nº 2, p. 117–129, dez. 1997, doi: 10.1590/S0103-65131997000200001.
- [34] M. Geidl, G. Koepfel, P. Favre-Perrod, B. Klockl, G. Andersson, e K. Frohlich, “Energy hubs for the future”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, nº 1, p. 24–30, 2007, doi: 10.1109/MPAE.2007.264850.
- [35] D. R. Palo, R. A. Dagle, e J. D. Holladay, “Methanol Steam Reforming for Hydrogen Production”, *Chem Rev*, vol. 107, nº 10, p. 3992–4021, out. 2007, doi: 10.1021/cr050198b.
- [36] S. de C. Alves, “Reforma a vapor do metano para produção de hidrogênio: estudo termodinâmico e protótipo de modelo matemático de reator com membrana”, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Acessado: 8 de junho de 2023. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15269/1/SCAlvesDISSPRT.pdf>
- [37] R. Lan e S. Tao, “Ammonia as a Suitable Fuel for Fuel Cells”, *Front Energy Res*, vol. 2, 2014, [Online]. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2014.00035>
- [38] K. Branker, M. J. M. Pathak, e J. M. Pearce, “A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, nº 9, p. 4470–4482, dez. 2011, doi: 10.1016/J.RSER.2011.07.104.
- [39] Lazard, “Lazard 2023 Levelized Cost Of Energy+”, abr. 2023. Acessado: 16 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <https://www.lazard.com/media/typdxxmm/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf>
- [40] U. Nissen e N. Harfst, “Shortcomings of the traditional ‘levelized cost of energy’ [LCOE] for the determination of grid parity”, *Energy*, vol. 171, p. 1009–1016, mar. 2019, doi: 10.1016/J.ENERGY.2019.01.093.
- [41] D. J. Murphy e C. A. S. Hall, “Year in review-EROI or energy return on (energy) invested”, *Ann. N.Y. Acad. Sci*, 2010.

- [42] S. Sgouridis, D. Csala, e U. Bardi, “The sower’s way: quantifying the narrowing net-energy pathways to a global energy transition”, *Environmental Research Letters*, vol. 11, nº 9, p. 94009, set. 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/9/094009.
- [43] D. Y. C. Leung, G. Caramanna, e M. M. Maroto-Valer, “An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, p. 426–443, nov. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.07.093.
- [44] J. G. Lambert, C. A. S. Hall, S. Balogh, A. Gupta, e M. Arnold, “Energy, EROI and quality of life”, *Energy Policy*, vol. 64, p. 153–167, jan. 2014, doi: 10.1016/J.ENPOL.2013.07.001.
- [45] International Renewable Energy Agency, “Renewable Power Generation Costs in 2018”, Abu Dhabi, 2019. Acessado: 16 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf
- [46] R. Costanza, “Embodied Energy and Economic Valuation”, *Science (1979)*, vol. 210, nº 4475, p. 1219–1224, 1980, doi: 10.1126/science.210.4475.1219.
- [47] I. Dincer e C. Acar, “Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 40, nº 34, p. 11094–11111, set. 2015, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2014.12.035.
- [48] L. Behringer, “Super-dense packing of hydrogen molecules on a surface | Neutron Science at ORNL”. <https://neutrons.ornl.gov/content/super-dense-packing-hydrogen-molecules-a-surface> (acessado 21 de junho de 2023).
- [49] R. Balderas-Xicohtencatl *et al.*, “Formation of a super-dense hydrogen monolayer on mesoporous silica”, *Nat Chem*, vol. 14, nº 11, p. 1319–1324, nov. 2022, doi: 10.1038/S41557-022-01019-7.
- [50] K. L. Davies e R. Moore, “UUV FCEPS technology assessment and design process”, jun. 2023.
- [51] NIST, “Propriedades termofísicas de sistemas fluidos”, *National Institute of Standard and Technology - U.S. Department of Commerce*, 2023. <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (acessado 22 de junho de 2023).
- [52] H. R. Varian, *Microeconomia: Uma abordagem moderna*, 9º ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2014. Acessado: 8 de junho de 2023. [Online]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6909148/mod_resource/content/1/Microeconomia%20-%20Hal%20Varian%209a%20edic%CC%A7a%CC%83o.pdf
- [53] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, e E. Simchi-Levi, “Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies”, *Journal of Business Logistics*, vol. 22, jun. 2001.

DADOS BIOGRÁFICOS



(1) VINICIUS NUNES FOLGANES

Sou estudante de Engenharia Elétrica no IFSC, onde também possui formação técnica. Atualmente, estagio na ENGIE, na coordenação de gestão e planejamento de portfólio, após passar pela FSET, onde desenvolvi habilidades em análise de dados e inteligência artificial para fornecer soluções inovadoras no mercado energético. Durante minha graduação, atuei como bolsista de iniciação científica na EMBRAPII, realizando estudos aplicados de análise climatológica e geoespacial, além de trabalhar em projetos de sistemas inteligentes de energia. Em 2017, fui pesquisador e intercambista no GECAD, onde participei do projeto SMARTENESS, focado no desenvolvimento de sistemas inteligentes para energias renováveis

(2) EVERTHON TAGHORI SICA

Engenheiro Eletricista pela UTFPR, Mestre e Doutor em Planejamento de Sistemas de Energia pela UFSC. Atualmente é professor do Instituto Federal de Santa Catarina e pesquisador em desenvolvimento tecnológico do Núcleo de Inovação em Sistemas Inteligentes de Energia (Pólo EMBRAPII). Experiência em planejamento de sistemas de energia elétrica, com ênfase em Planejamento Integrado de Recursos Energéticos, atuando principalmente nos seguintes temas: eficiência energética, geração distribuída e energias renováveis, planejamento de recursos energéticos distribuídos e recursos hídricos, sistemas multicritério de apoio à decisão, economia de recursos naturais e meio ambiente, economia do hidrogênio e teoria econômica aplicada ao setor elétrico.

APÊNDICE B – CERTIFICADOS DE PARTICIPAÇÃO E AUTORIA



XXVII Seminário Nacional
de Produção e Transmissão
de Energia Elétrica

CERTIFICADO

Conferimos o presente certificado a

Vinicius Nunes Folganes

pela participação no XXVII SNPTEE, realizado no
período de 26 a 29 de novembro de 2023, em Brasília-DF

João Carlos de Oliveira Mello
Diretor-Presidente do CIGRE-Brasil

Antonio Augusto Bechara Pardaul
Coordenador Geral

Promoção



Coordenação





XXVII Seminário Nacional
de Produção e Transmissão
de Energia Elétrica

CERTIFICADO

Conferimos o presente certificado a

Vinicius Nunes Folganes

pela autoria do Informe Técnico apresentado no XXVII SNPTEE, realizado no
período de 26 a 29 de novembro de 2023, em Brasília-DF

João Carlos de Oliveira Mello
Diretor-Presidente do CIGRE-Brasil

Antonio Augusto Bechara Pardauil
Coordenador Geral

Promoção



Coordenação



APÊNDICE C – PARTICIPAÇÃO NO EVENTO

Figura 1 – Foto do Evento 1.



Fonte: o Autor.

Figura 2 – Foto do Evento 2.



Fonte: o Autor.

Figura 3 – Foto do Evento 3.



APÊNDICE D – SLIDES APRESENTADOS NO CONGRESSO



XXVII Seminário Nacional de

Produção e Transmissão de Energia Elétrica

A Competitividade do Hidrogênio como Vetor
Energético para Sistemas Econômico Produtivos
frente aos Recursos Energéticos Distribuídos

Informe Técnico GE - 1842

Vinicius N. Folganes
e Everthon T. Sica



INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina



TRANSFORMAÇÃO ENERGÉTICA: HIDROGÊNIO COMO AGENTE DE MUDANÇA

Equilibrando crescimento econômico e sustentabilidade ambiental na era da alta demanda por energia e transição para fontes renováveis

Efeito estufa e mudanças climáticas

A industrialização contribui para o aumento do efeito estufa e das mudanças climáticas

Demanda Global por Energia

O crescimento industrial impulsiona o aumento da demanda global de energia, com predominância dos combustíveis fósseis

Transição Energética

Marcada pelo desafio da redução dos gases de efeito estufa e o suprimento energético para uma indústria pujante

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O papel do hidrogênio como vetor energético

Necessidade de transição energética

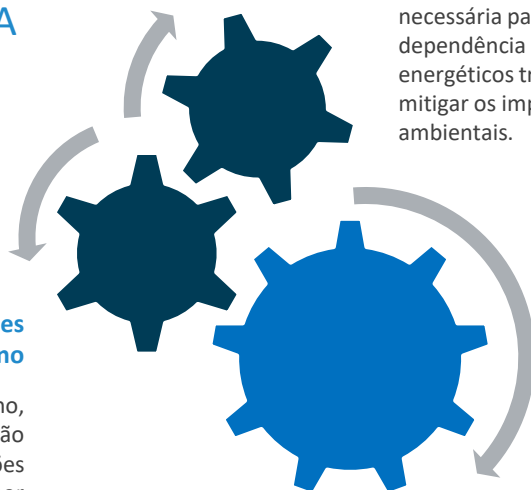
A transição energética é necessária para reduzir a dependência de recursos energéticos tradicionais e mitigar os impactos ambientais.

O Comércio de Emissões de Carbono

Os créditos de carbono, representam uma redução quantificável de emissões de GEE e são gerados por projetos que diminuem ou sequestram essas emissões

O Hidrogênio de baixo Carbono “Verde”

O H₂V é produzido a partir de energia renovável e pode ser certificado, fomentando um mercado para IRECs e RECs baseados em hidrogênio



Recursos Energéticos Distribuídos (REDs)

XXVII Seminário de
Produção e Transmissão
de Energia Elétrica



Os Recursos Energéticos Distribuídos

Essencialmente, REDs são recursos de pequena escala, instalados próximo ao ponto de consumo, capazes de fornecer energia elétrica e compreendem uma ampla gama de tecnologias, incluindo a geração distribuída, armazenamento de energia, resposta à demanda e veículos elétricos



Imagem gerada por inteligência artificial

Hidrogênio como Vetor Energético

XXVII Seminário de
Produção e Transmissão
de Energia Elétrica



HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO

O hidrogênio atua como um intermediário na conversão, armazenamento e transporte de energia, com diferentes categorizações, incluindo verde, azul e cinza, dependendo do método de produção.



Hidrogênio

O hidrogênio, assim produzido, pode ser armazenado e, posteriormente, utilizado como insumo e **agregador de valor para commodities** ou mesmo para geração de eletricidade em períodos de demanda elevada ou baixa produção para responder de forma eficiente às flutuações na demanda de energia.

Hidrogênio como Vetor Energético

Eletrólise

A eletrólise “quebra” a água em hidrogênio e oxigênio usando eletricidade. Pode ser neutra em carbono quando a eletricidade é proveniente de fontes renováveis. É adequada para integração com fontes intermitentes, como solar e eólica, mas enfrenta desafios de eficiência e custos.

Reforma a Vapor do Metanol (RVM)

A produção de hidrogênio envolve a reação de metanol com água na presença de um catalisador. A pegada de carbono depende da origem do metanol e do tratamento do CO₂ gerado.

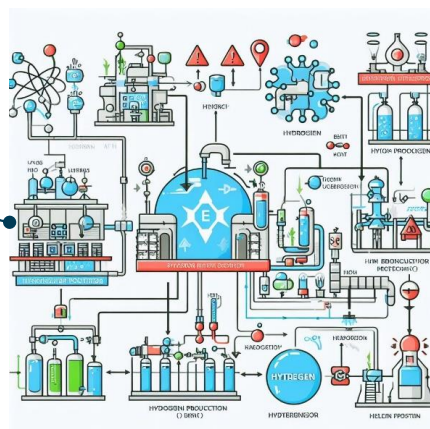


Imagem gerada por inteligência artificial

Reforma de Metano a Vapor (SMR)

Essa é a principal rota para a produção em larga escala de hidrogênio. Ela envolve a reação do metano com água a altas temperaturas para produzir hidrogênio e dióxido de carbono. Embora seja eficiente, gera altas emissões de CO₂.

Decomposição Catalítica de Amônia:

Esse método tem baixas emissões de carbono e envolve a decomposição da amônia em hidrogênio e nitrogênio na presença de um catalisador.

Hidrogênio como Vetor Energético

XXVII Seminário de
Produção e Transmissão
de Energia Elétrica



O USO INDUSTRIAL DO HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio é amplamente empregado na produção de amônia, refino de petróleo e, cada vez mais, como fonte de energia para geração de energia elétrica, substituindo o gás natural.

Geração de Energia Elétrica

O hidrogênio é utilizado em células de combustível para gerar eletricidade de maneira limpa. Além disso, o hidrogênio é visto como uma solução para armazenar energia excedente de fontes renováveis e estabilizar a rede elétrica.

Setor Siderúrgico e Vidro

O hidrogênio é considerado uma alternativa para reduzir as emissões de CO₂ na indústria siderúrgica e de vidro, onde as produções tradicionais frequentemente dependem de combustíveis fósseis.

Aço Verde e Redução de Emissões de CO₂

O hidrogênio é fundamental na produção de "aço verde" (Green Steel), que busca reduzir o minério de ferro sem emissões significativas de CO₂.

Produção de Amônia e Refino de Petróleo

Mais de 50% do hidrogênio produzido globalmente é usado na indústria petroquímica, principalmente para a produção de amônia, que representa cerca de 1-2% do consumo mundial de energia.

50%

Hidrogênio como Vetor Energético

ECONOMIA DE ESCOPO COM A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

A produção de hidrogênio pode beneficiar-se da economia de escopo, onde subprodutos como oxigênio e calor podem ser aproveitados para outros processos industriais.

O uso do oxigênio, comercialmente, ainda depende da redução de custos e de eficiência nos processos de purificação e compressão, entre outros.



Cogeração e Uso de Subprodutos

A produção de hidrogênio muitas vezes gera subprodutos, como oxigênio e calor. Esses subprodutos podem ser aproveitados em outros processos industriais, aumentando a eficiência e reduzindo o desperdício de recursos.



Integração de tecnologias

A integração de tecnologias, como a eletrólise alimentada por energia renovável, em instalações industriais pode reduzir os custos de produção de hidrogênio e as emissões de carbono. Essa abordagem de economia de escopo permite uma produção mais eficiente e ambientalmente amigável.



Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos, que combinam diferentes tecnologias de produção de energia em uma única instalação, também podem ser aplicados à produção de hidrogênio. Isso visa melhorar a eficiência e a confiabilidade geral do sistema, reduzindo custos e impacto ambiental.

AVALIAÇÃO DO PAPEL DO HIDROGÊNIO

A avaliação da performance do hidrogênio como vetor energético requer consideração não apenas como recurso energético, mas também como um meio de transferência de energia, com indicadores específicos para análise e tomada de decisões.

Compreensão do Hidrogênio como Vetor Energético

É essencial reconhecer que o hidrogênio não é apenas uma fonte de energia, mas atua como um intermediário na conversão, armazenamento e transporte de energia.

Indicadores Específicos de Desempenho

Para uma análise precisa, são necessários indicadores específicos que avaliem a eficiência, as emissões de carbono e os custos associados à produção e utilização do hidrogênio.

Tomada de Decisões Sustentáveis

Através dos indicadores de desempenho é possível tomar decisões informadas que promovam a sustentabilidade, identificando as melhores aplicações e métodos de produção.

A IMPORTÂNCIA DE AVALIAR A PERFORMANCE DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO

Compreender as nuances técnicas e econômicas desses processos propicia uma perspectiva sobre a viabilidade e impacto do hidrogênio como uma fonte de energia, sendo particularmente importante considerar o hidrogênio não só como um recurso energético, mas também como um vetor energético.



Imagem gerada por inteligência artificial

Avaliação da Performance do Hidrogênio como Vetor Energético: Uma abordagem por indicadores

XXVII Seminário de
Produção e Transmissão
de Energia Elétrica



“LEVELIZED COST OF ELECTRICITY” LCOE

Esse método compara custos entre diferentes fontes de energia, avaliando o custo médio por unidade de energia gerada ao longo da vida útil. É fundamental para analisar a competitividade do hidrogênio como vetor energético.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n (I_t + M_t + F_t)}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

- I: Investimento
- M: Custos O&M
- F: Despesas
- E: Energia elétrica
- r: Taxa de desconto
- n: Vida útil (anos)

\$\$

Indicador para comparar custos de diferentes meios de geração de energia.

Avalia eficácia, com base no custo médio por unidade de energia gerada durante a vida útil do sistema.

Facilita a comparação equitativa entre várias tecnologias e fontes de energia.

Importante na análise da competitividade do hidrogênio como vetor energético.

Avaliação da Performance do Hidrogênio como Vetor Energético: Uma abordagem por indicadores

XXVII Seminário de
Produção e Transmissão
de Energia Elétrica



“LEVELIZED ENERGY VECTOR OF HYDROGEN” LEVOH

Esse método é a adaptação proposta do método LCOE para uma análise do hidrogênio como vetor energético, considerando as unidades energéticas exclusivamente em Joules.

$$LEVOH = \frac{\sum_{t=1}^n (Ei_t + Ai_t) * \eta}{\sum_{t=1}^n \frac{H_t + O_t - Cr_t}{(1 + r)^t}}$$

- Ei: Energia elétrica injetada
- A: Água injetada
- η : Rendimento do processo
- H: Hidrogênio resultante
- O: Oxigênio resultante
- C: Calor residual do processo
- r: Taxa de aproveitamento do oxigênio resultante
- n: Vida útil (anos)

Avaliação da Performance do Hidrogênio como Vetor Energético: Uma abordagem por indicadores

XXVII Seminário de
Produção e Transmissão
de Energia Elétrica



“ENERGY RETURN ON INVESTMENT” EROI

O EROI avalia a eficiência e viabilidade de fontes de energia, relacionando a energia obtida à energia consumida. É importante para a avaliação da eficiência do sistema de geração de energia com hidrogênio.

$$EROI = \sum_{t=1}^n \frac{E_{out_t}}{E_{in_t}}$$

- Ein: Energia necessária para produzir
- Eout: Energia resultante produzida

Representa a relação entre a energia obtida e a energia consumida para extraí-la.

Pode ter um balanço energético inferior para energias renováveis e hidrogênio em comparação com combustíveis fósseis

Avalia a eficiência energética e a viabilidade de fontes de energia.

Importante na análise da competitividade do hidrogênio como vetor energético.

Avaliação da Performance do Hidrogênio como Vetor Energético: Uma abordagem por indicadores

XXVII Seminário de
Produção e Transmissão
de Energia Elétrica



“ENERGY RETURN ON INVESTMENT” EROI

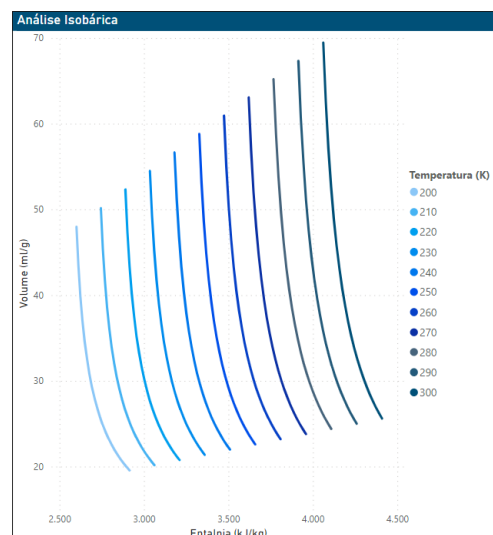
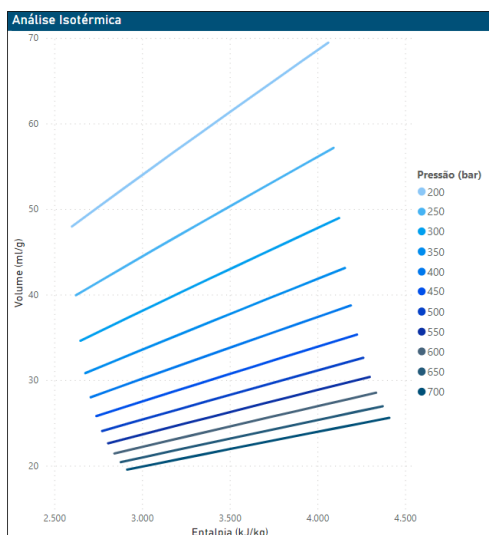
Proposta de adaptação do método EROI, agora considerando a energia injetada e resultante como parcelas energéticas em joules de eletricidade, oxigênio, hidrogênio e água.

$$EROI = \sum_{t=1}^n \frac{(H_t + O_t)}{(Ei_t + Ai_t)}$$

- Ei: Energia elétrica injetada
- A: Água injetada
- H: Hidrogênio resultante
- O: Oxigênio resultante
- n: Vida útil (anos)

DENSIDADE ENERGÉTICA E VALORES ENERGÉTICOS

A avaliação da competitividade do hidrogênio como vetor energético, em comparação com fontes tradicionais como energia solar e eólica, requer uma abordagem padronizada. A unidade de energia Joule (J) é proposta para essa comparação, levando em conta as mudanças temporais e espaciais nas fontes e demandas energéticas. A entalpia é crucial para avaliar a eficiência energética do hidrogênio.



DENSIDADE ENERGÉTICA E VETORES ENERGÉTICOS

A densidade gravimétrica (energética) [MJ/kg], que mede a energia armazenada por unidade de massa, é fundamental. O hidrogênio tem alta densidade gravimétrica, mas baixa densidade volumétrica, afetando o espaço necessário para armazenamento.

141 MJ/KG

Hidrogênio

O hidrogênio tem a maior densidade energética gravimétrica de qualquer combustível (cerca de 141 MJ/kg), sua densidade energética volumétrica é muito baixa em condições normais de temperatura e pressão, acarretando muito espaço para armazenar uma quantidade útil de energia em forma de hidrogênio

15 MJ/KG

Oxigênio

Quando se avalia o oxigênio, observa-se uma densidade energética gravimétrica em torno de 15 MJ/kg, cerca de 10 vezes menor que a do hidrogênio

COMMODITY?

HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO VERSÁTIL

O estudo ressalta o hidrogênio como um vetor energético que se diferencia da concepção tradicional de uma commodity. Ele não é apenas um bem homogêneo, mas também um produto final e um fator de produção que agrega valor a outras commodities.

VALOR AGREGADO E REDUÇÃO DE EMISSIONES

A análise econômica destaca a importância de considerar fatores adicionais na avaliação do hidrogênio, como sua produção a partir de fontes renováveis. Esses fatores conferem valor agregado, especialmente no mercado de carbono.

PAPEL ESTRATÉGICO E DESAFIOS

O hidrogênio pode desempenhar um papel crucial na transição para uma economia de baixo carbono, mas essa transição requer uma gestão estratégica e coordenação entre políticas públicas, indústria e sociedade. A complexidade da cadeia de valor do hidrogênio deve ser compreendida e gerenciada para promover um futuro energético sustentável e resiliente.

REGULAÇÃO PERSPECTIVAS FUTURAS

Para futuras pesquisas, é recomendado aprofundar a análise do hidrogênio, considerando diferentes cenários geopolíticos e regulatórios. Além disso, explorar novas tecnologias de produção e uso do hidrogênio é essencial. O desafio está em construir uma visão integrada que maximize o potencial do hidrogênio e minimize os riscos e impactos negativos associados.

Vinicius Nunes Folganes
&
D. Eng. Everton Taghori Sica

folganesv@gmail.com

acmesica@ifsc.edu.br



Promoção



Coordenação

