LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

Uma análise de modelos de otimização aplicados à Cadeia de Suprimentos do Hidrogênio

Maria Vitória da Silva Lima [a,b]
vitoria.slima@ufpe.br
Isis Didier Lins [a,b]
isis.lins@ufpe.br
Caio Bezerra Souto Maior [a,b,c]
caio.maior@ufpe.br
Márcio José das Chagas Moura [a,b]
marcio.cmoura@ufpe.br

[a] Centro de Estudos e Ensaios em Risco e Modelagem Ambiental (CEERMA)
[b] Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. da Arquitetura, s/n - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550
[c] Centro de Tecnologia (UFPE)
Av. Marielle Franco, s/n - Km 59 - Nova, PE, 55014-900

RESUMO

A transição energética exige uma transformação dos sistemas de energia, em busca de fontes mais limpas. Nesse contexto, o hidrogênio verde aparece como uma solução. Este trabalho faz uma análise de literatura envolvendo artigos relacionados a modelos de otimização da cadeia de suprimentos de hidrogênio publicados em revistas científicas. São apresentados os elementos principais da cadeia de suprimento do hidrogênio verde e os modelos a eles associados são analisados e classificados com base em decisões e metodologias. Por fim, a análise mostra que o uso de modelos de otimização é importante para permitir o avanço de tecnologias da cadeia de suprimentos de hidrogênio verde; no entanto, é preciso explorar também a aplicação de métodos pouco utilizados nesses contextos.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, Programação Linear, Hidrogênio Verde.

EN&PG, PM, POI.

ABSTRACT

The energy transition requires transforming energy systems in search of cleaner sources. In this context, hydrogen appears as a solution. This work reviews the literature involving articles related to hydrogen supply chain optimization models published in scientific journals. The main elements of the green hydrogen supply chain are presented and the models associated with them are analyzed and classified based on decisions and methodologies. Finally, a review shows that the use of optimization models is important to enable the advancement of hydrogen supply chain technologies, however, it is also necessary to study the application of methods little used in these contexts.

KEYWORDS. Optimization. Linear Programming. Green Hydrogen.

EN&PG, PM, POI.

https://proceedings.science/p/193682?lang=pt-br

1. Introdução

A descarbonização do planeta é uma meta traçada por muitos países ao redor do mundo. O objetivo comum decorre dos grandes problemas ambientais e climáticos causados pela emissão de gases do efeito estufa (GEE). Nesse sentido, a descarbonização encontra o Hidrogênio Verde (H2V) como uma alternativa que pode solucionar o grande problema de emissões, visto que o atual fornecimento de hidrogênio depende da gaseificação do carvão e da reforma a vapor do gás natural, o qual é denominado Hidrogênio Cinza [Yue et al. 2021].

A infraestrutura da economia do hidrogênio inclui questões de logística da cadeia de suprimento, desde a produção de hidrogênio até o transporte e armazenamento aos postos de abastecimento [Gim et al. 2012]. Com a crescente produção de H2V, é necessário que tais objeções recebam a devida atenção, pois os desafios associados à cadeia de suprimentos devem ser enfrentados. Desse modo, o presente trabalho apresentará uma análise de contextos de otimização da cadeia de suprimentos com uso de programação matemática (PM). Os artigos analisados são resultados de uma pesquisa em andamento, com foco na otimização da rede de transporte de hidrogênio no nordeste brasileiro.

2. Metodologia

Nesta análise foram coletados dados de 10 artigos, em uma busca realizada na Web of Science em 22 de maio de 2024, excluindo revisões da literatura e incluindo apenas artigos publicados em inglês. Os termos de busca foram "Hydrogen" AND "Optimization" AND ("Energy" OR "Decarbonization"), vinculados aos filtros: AND ("Transport*" OR "Distribution"), AND “Green”, AND “Supply Chain”, AND ("Transport*" OR "Distribution") AND “Supply Chain”, AND ("Transport*" OR "Distribution") AND “Green”, AND “Supply Chain” AND “Green” e ("Transport*" OR "Distribution") AND "Supply Chain" AND "Green". Para o último filtro, 34 artigos foram encontrados, lidos e selecionados os 10 mais rigorosamente dentro do escopo.

2.1. Modelos de otimização aplicados à cadeia de suprimentos do hidrogênio

O hidrogênio suscitou muito interesse e investimento em todo o mundo. Esta atenção é atribuída devido à natureza do hidrogênio como uma molécula de queima limpa e à possibilidade de ser produzida a partir de uma variedade de fontes de energia de baixo carbono [Ibrahim & Al-Mohannadi 2023]. Esse interesse resulta no aumento de modelos matemáticos aplicados à otimização da cadeia de suprimentos de hidrogênio verde (H2V). Para os 10 artigos selecionados, informações sobre método de otimização, objetivo do modelo, escala espacial para aplicação e status de descrição do modelo foram coletadas e podem ser consultadas na Tabela 1.

	TIPO DE MODELO			OBJETIVO		ESCALA ESPACIAL		DESCRIÇÃO COMPLETA	
	RE	MILP	MINLP	Multi	Mono	N	R	Sim	Não
Kazi et al. 2021		X			X	X		X	
Parolin et al. 2022		X			X		X	X	
Cutore et al. 2024		X		X			X	X	
Doniavi et al. 2023		X			X	X		X	
Derse et al. 2020			X		X	X		X	
Ibrahim e Al-Mohannadi 2023		X			X	X			X
Ochoa Bique e Zondervan 2018		X			X	X		X	
Reuß et al. 2019	X			X		X			X
Li et al. 2008		X		X			X	X	
Erdogan e Guler 2023		X		X		X		X	

RE: Resolução Espacial, MILP: Programação Linear Inteira Mista, MINLP: Programação Não Linear Inteira Mista, N: Nacional, R: Regional

Tabela 1: Classificação dos trabalhos quanto ao modelo, número de objetivos, abrangência e descrição completa do problema de otimização

O objetivo comum nos estudos apresentados é a minimização do custo da cadeia de suprimentos. No entanto, a resolução aparece através de várias abordagens, inputs e considerações. A maioria dos trabalhos utilizaram água, gás natural e carvão como matéria-prima para as tecnologias de

eletrólise, gaseificação e reforma a vapor. Os transportes mais utilizados foram caminhões e gasodutos, não excluindo o uso de demais opções. Por fim, o armazenamento ficou resumido, principalmente, mas não exclusivamente, a tanques e instalações de armazenamento.

A aplicação de caminhos diversos pelo objetivo comum fica ainda mais clara nos trabalhos que abordam MILP, que tem uma perspectiva mais frequente na literatura analisada. A minimização do custo total é objetivo principal em quatro dos seis trabalhos que utilizam MILP. O custo total anual é minimizado à medida que se encontra a rede ideal de cadeia de suprimentos de hidrogênio (HSCN) de produção de H2 [Kazi et al. 2021], [Parolin et al. 2022], [Ibrahim e Al-Mohannadi 2023], [Bique e Zondervan 2018]. De forma semelhante, o MILP é utilizado para objetivos de minimização de custo, emissões de dióxido de carbono e risco de segurança em [Erdogan & Guler 2023] e utilizando custos associados à construção de instalações, demanda de produção e transporte [Doniavi et al. 2023]. Encontrar a localização e as capacidades ideais da infraestrutura de hidrogênio, ao mesmo tempo que minimiza o custo, também é um meio aplicável para o modelo. Nesse modelo, os resultados mostram o melhor estado físico do H2 para o meio de transporte mais atraente em termos econômicos [Cutore et al. 2024]. Isso porque mostra resultados mais detalhados, se comparado ao caso de objetivo único de minimização de custo. A MILP também serve para apoiar a decisão, como no caso de apoiar o planejamento de investimentos estratégicos e gestão de ativos da HSCN [Li et al. 2008].

A análise do uso de MINLP para a otimização da cadeia de suprimentos de H2 dispõe de apenas um trabalho relacionado, tal como o uso de resolução espacial. O MINLP foi usado em uma abordagem para minimizar impactos ambientais, enquanto considera o custo da cadeia de suprimentos, além de custo de segurança e mão-de-obra. Os resultados mostraram que as instalações de produção propostas no modelo conseguem suprir a demanda total das regiões impedidas de ter a própria instalação devido a alguma restrição do problema [Derse et al. 2020]. A resolução espacial aplicada a um problema de otimização na HSCN foi utilizada para avaliar infraestruturas, analisar custos resultantes e emissões de dióxido de carbono [Reuß et al. 2019]. Os resultados mostraram tanto os tamanhos ideais de clusters de postos de abastecimento, como as tecnologias mais eficientes de transporte e armazenamento.

3. Resultados e Discussão

Em um cenário de otimização da HSCN, há variadas abordagens potenciais, dependendo das características específicas de cada problema. Uma análise mais detalhada dos diferentes modelos de otimização mostra que os MILP se destacam, especialmente em problemas de logística, alocação de recursos e planejamento de produção. Essas situações, frequentemente com relações lineares, tornam o uso de MILP mais apropriado. No entanto, para problemas mais complexos e que envolvem variáveis não lineares, a MINLP foi empregada. Nesse caso, o modelo pode proporcionar soluções mais adequadas para problemas de maior complexidade, mas à custa de maior esforço computacional e complexidade na modelagem. Embora a resolução espacial não seja um método de otimização, ela foi utilizada em problema de localização de produção de hidrogênio, evidenciando sua importância na consideração das características geográficas.

4. Conclusão

A diversidade e complexidade dos processos da cadeia de suprimentos de hidrogênio exigem abordagens de otimização flexíveis, robustas e eficientes. Os modelos de MILP demonstram ser eficazes e frequentes na otimização de problemas relacionados ao planejamento de produção e logística. O estudo também destacou a relevância de MINLP. Embora o uso de MILP seja predominante, é limitada em cenários com variáveis não lineares ou onde a especificidade do contexto, como recursos geográficos ou tecnológicos, não é suficientemente capturada. Assim, futuras pesquisas devem explorar mais a fundo essas limitações e buscar desenvolver modelos que sejam mais adaptáveis a uma variedade maior de cenários. Por fim, a necessidade de personalizar modelos de otimização para refletir melhor as especificidades locais destaca-se como um aspecto importante para o avanço da HSCN de forma sustentável e eficiente.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem às agências brasileiras de fomento à pesquisa Programa de Recursos Humanos (PRH 38.1) intitulado "Análise de Risco e Modelagem Ambiental na Exploração, Desenvolvimento e Produção de Petróleo e Gás", financiado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) e gerido pela FINEP, 'Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico' (CNPq): 402761/2023-5, 310892/2022-8, 308924/2021-5, e 'Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)' - Código Financeiro 001 para o apoio financeiro através de bolsas de investigação.

6. Referências

Cutore, E., Fichera, A, Inturri, G., Le Pira, M. e Volpe, R. (2024). Spatially-explicit optimization of an integrated wind-hydrogen supply chain network for the transport sector: The case study of Sicily. International Journal of Hydrogen Energy, 52:761-774. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.105.

Derse, O., Göçmen, E., Yılmaz, E., & Erol, R. (2020). A mathematical programming model for facility location optimization of hydrogen production from renewable energy sources. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 44:6648–6659. Doi: https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1812769.

Doniavi, E., Babazadeh R. e Hasanzadeh R. (2023). Optimization of Renewable Energy Supply Chain for Sustainable Hydrogen Energy Production from Plastic Waste. *Sustainability*. 15:16813. Doi: https://doi.org/10.3390/su152416813.

Erdogan, A. e Guler, M. G. (2023). Optimization and analysis of a hydrogen supply chain in terms of cost, CO2 emissions, and risk: the case of Turkey. International Journal Hydrogen Energy. 48:22752-22765. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.300.

Gim, B., Boo, K. J., e Cho, S. M. (2012). A transportation model approach for constructing the cost effective central hydrogen supply system in Korea. International Journal of Hydrogen Energy, 37(2), 1162-1172. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.120.

Ibrahim, S. e Al-Mohannadi, D. M. (2023). Optimization of low-carbon hydrogen supply chain networks in industrial clusters. International Journal of Hydrogen Energy, 48: 13325-13342. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.090.

Kazi, M.K., Eljack, F., El-Halwagi, M. M. e Haouari, M. (2021). Green hydrogen for industrial sector decarbonization: Costs and impacts on hydrogen economy in Qatar. Computers & Chemical Engineering, 145:107144. Doi: https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107144.

Li, Z., Gao, D., Chang, L., Liu, P. e Pistikopoulos, E. N. (2008). Hydrogen infrastructure design and optimization: A case study of China. International Journal of Hydrogen Energy. 33:5275-5286. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.076.

Ochoa Bique, A. e Zondervan, E. (2018). An outlook towards hydrogen supply chain networks in 2050 – Design of novel fuel infrastructures in Germany. Chemical Engineering Research and Design, 134:90-103. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.03.037.

Parolin, F., Colbertaldo, P. e Campanari, S. (2022).Development of a multi-modality hydrogen delivery infrastructure: An optimization model for design and operation. Energy Conversion and Management, 266: 115650. Doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115650.

Reuß, M., Grube, T., Robinius, M. e Stolten, D. (2019). A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany. Applied Energy, 247:438-453. Doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.064

Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., e Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146:1364-0321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180.