

ESTUDO DOS IMPACTOS 3D NOS SISTEMAS ELÉTRICOS: UMA BREVE REVISÃO DA LITERATURA

Fernando Gonçalves Penna Neto¹ (IC), Cláudia Eliane da Matta (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

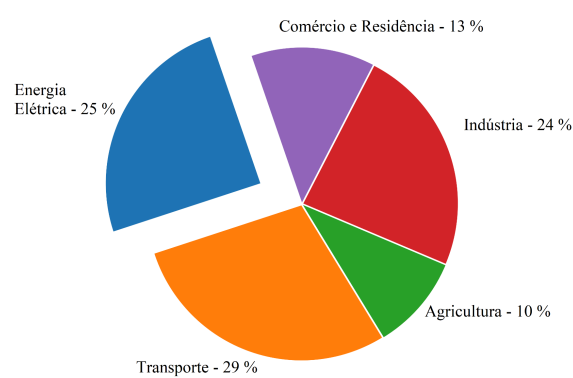
Palavras-chave: Descarbonização. Descentralização. Digitalização. Revisão sistemática da literatura.

Introdução

Este estudo, originado de uma iniciação científica, insere-se no contexto das energias renováveis e tem como objetivo realizar uma revisão sistemática de literatura, sobre os impactos da descarbonização, descentralização e digitalização (3D) na geração e transmissão de energia elétrica. A pesquisa busca responder à pergunta: “Quais são os impactos que os processos de 3D têm na geração e transmissão da energia elétrica e como esses impactos nas redes elétricas estão sendo controlados?”

A realização desta pesquisa é justificada pelo rápido crescimento das energias renováveis e sua relevância para os objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), que incluem a transição para fontes de energia mais sustentáveis, em um esforço para reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) em diversos setores (Figura 1).

Figura 1 - Porcentagens de emissões de GEE em diversos setores econômicos



Fonte: Elaboração própria (2023). Baseado em *United States Environmental Protection Agency* (2023).

A metodologia adotada consiste em uma revisão sistemática de literatura na base de dados *IEEE Xplore*.

Metodologia

A metodologia seguiu as diretrizes de Akobeng

(2005), focando nos seguintes passos: definição de objetivos e critérios de elegibilidade, busca por publicações relevantes, tabulação e avaliação da qualidade metodológica dos estudos selecionados, aplicação de critérios de elegibilidade e justificação de exclusões, compilação de dados e sumarização dos resultados.

A busca inicial por estudos foi conduzida na base de dados *IEEE Xplore*, selecionada por sua relevância em engenharia elétrica e eletrônica. Foram utilizados critérios específicos de inclusão, como a limitação a artigos de periódicos publicados entre 2010 e 2024, e a aplicação de operadores de busca ("AND", "OR") e caracteres coringa ("??") para maximizar a abrangência dos resultados. Após a aplicação desses filtros, 62 publicações foram inicialmente selecionadas, sendo posteriormente refinadas por meio de leitura de títulos e resumos, resultando em 17 estudos que atenderam aos critérios estabelecidos, mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Protocolo adotado para a revisão sistemática de literatura

Critério	Inclusão (CI)	Exclusão (CE)
Tópico de estudo	Estudos que abordam os impactos 3D nas redes elétricas (CI1)	Estudos na forma de revisões da literatura. (CE1)
Tipo de documento	Artigos de resultados de pesquisas publicados em revistas científicas. (CI2)	Estudos na forma de dissertações ou teses resumidas, conferências ou editoriais, livros, resenhas de livros, notas editoriais, notícias e relatórios. (CE2)

Relevância	Estudos com assunto similar ou igual a outro estudo, mas que responderam à pergunta de “Quais os impactos da 3D nas redes elétricas e como esses impactos estão sendo controlados?” com mais detalhes, dados ou resultados relevantes. (CI3)	Estudos que responderam superficialmente à pergunta “Quais são os impactos da 3D nas redes elétricas e como esses impactos estão sendo controlados?” (CE3)
------------	--	--

Fonte: Autoria própria (2024)

Resultados e discussão

Após analisar as 17 referências coletadas com a pesquisa sistemática da literatura, foram encontrados resultados relacionados aos impactos 3D dos veículos elétricos na rede de energia, e às mudanças na geração e transmissão de energia causadas por energias renováveis. Com base nisso, foi feita uma análise desses resultados, divididos em três categorias: descarbonização, digitalização e descentralização.

Descarbonização

A descarbonização do setor elétrico é essencial para a mitigação das mudanças climáticas, já que o setor de energia é responsável por 25 % das emissões de GEE (Figura 1). Apesar disso, a transição para fontes renováveis enfrenta desafios significativos, especialmente a falta de inércia rotacional nos sistemas, um mecanismo que estabiliza a rede elétrica em momentos de variações de carga (Holttinen *et al.*, 2022).

Sem a inércia rotacional, o uso de inversores com resposta formadora de rede (*grid forming response*) surge como uma solução mais confiável, em comparação à abordagem tradicional de acompanhamento de rede (*grid following response*), que apresenta atrasos em sistemas com alta penetração de renováveis (Kez; Foley; Morrow, 2022). Além disso, tecnologias complementares, como captura de carbono e sistemas de “veículo para rede”, podem aumentar a eficiência da geração renovável e reduzir custos operacionais (Cao *et al.*, 2021).

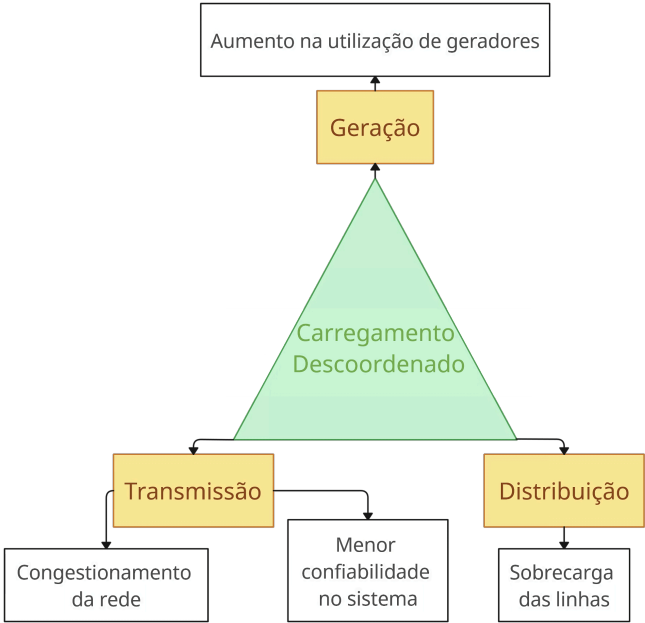
A adoção de veículos elétricos também desempenha um papel importante na descarbonização do setor de transporte. O aumento da autonomia desses veículos, deve acelerar sua adoção, apesar dos desafios

que essa mudança impõe à infraestrutura elétrica (Tirunagari; Gu; Meegahapola, 2022).

Digitalização

A digitalização desempenha um papel crucial na integração de veículos elétricos e fontes renováveis às redes elétricas. O carregamento descoordenado desses veículos pode gerar problemas (Figura 2), afetando a confiabilidade da rede (Tirunagari; Gu; Meegahapola, 2022).

Figura 2 - Problemas advindos do carregamento descoordenado de veículos elétricos



Fonte: Autoria própria (2024). Baseado em Tirunagari, Gu e Meegahapola (2022).

Uma solução é o carregamento inteligente, que ajusta o carregamento dos veículos para horários de menor demanda, aliviando a pressão sobre a rede (Rivera *et al.*, 2023).

No contexto das energias renováveis, a digitalização também é essencial para o gerenciamento da geração imprevisível. Tecnologias como armazenamento de energia e resposta à demanda, que ajustam o consumo em resposta às condições da rede, dependem de sistemas digitalizados para garantir o equilíbrio entre oferta e demanda (Pudjianto; Strbac, 2022). Outras tecnologias, como *power-to-gas* e baterias de gravidade, ajudam a armazenar o excedente de energia gerado, permitindo seu uso posterior, otimizando a geração renovável (Nazari-Heris *et al.*, 2020).

Por fim, algoritmos de previsão de geração renovável e controle digital de inversores garantem que os sistemas de geração funcionem de forma sincronizada

com a rede, maximizando a eficiência e a estabilidade da operação (Xie *et al.*, 2023).

Descentralização

A descentralização no setor elétrico traz benefícios como a oferta de serviços ancilares pela geração local à rede principal, reduzindo impactos negativos de fontes renováveis e interrupções na transmissão (Bellizio *et al.*, 2023). Com isso, surgem os "prosumidores", que geram energia própria e vendem o excedente, facilitado por mecanismos como *blockchain*, que garantem segurança e confiança nas transações energéticas (Akkaoui *et al.*, 2022).

Por outro lado, a descentralização também aumenta a vulnerabilidade a ciberataques, já que sistemas descentralizados dependem de dados de *feedback* entre prosumidores, a rede e aplicações inteligentes (Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023). Portanto, novas medidas de cibersegurança estão sendo desenvolvidas para proteger essas redes, especialmente em microrredes.

Além disso, o conceito de "veículo para rede" permite que veículos elétricos sirvam como sistemas móveis de armazenamento de energia, oferecendo suporte à rede de transmissão. No entanto, há desafios para garantir a durabilidade das baterias e a confiabilidade do veículo para rede em microrredes, mas novos métodos de preservação da vida útil das baterias estão sendo desenvolvidos (S. Li *et al.*, 2022), contribuindo para a descarbonização.

Conclusões

Este estudo buscou compreender os impactos 3D nas redes de energia, destacando as transformações em curso no setor elétrico rumo à sustentabilidade. A transição para energias renováveis, a crescente popularidade dos veículos elétricos e a expansão da geração descentralizada estão entre os principais esforços globais para descarbonizar a economia.

A integração de veículos elétricos representa uma oportunidade significativa para reduzir as emissões GEE no setor de transportes. Contudo, o gerenciamento adequado do carregamento desses veículos é essencial para evitar problemas de qualidade de energia elétrica, como oscilações de tensão e instabilidades. A digitalização, por sua vez, desempenha um papel crucial no gerenciamento eficiente dos sistemas elétricos, permitindo a integração de fontes renováveis e sistemas de armazenamento energético, que são fundamentais para equilibrar a geração intermitente dessas fontes.

A descentralização também se mostra

promissora, com o aumento de prosumidores e microrredes oferecendo serviços ancilares e contribuindo para a resiliência das redes locais e principais. No entanto, essa nova configuração introduz desafios de segurança cibernética, pois as interações entre microrredes e redes de transmissão deixam mais vulnerabilidades expostas a ataques.

Diante desses avanços, o estudo ressalta que a transição para um futuro energético mais sustentável é possível, mas depende da capacidade de adaptação e inovação para acomodar essas transformações. Novos modelos de cibersegurança, normas para a interação de microrredes com a rede principal e sistemas eficientes de gerenciamento de carregamento de veículos elétricos são necessários para garantir que o setor elétrico possa suportar a evolução trazida pela 3D.

Agradecimentos

Agradeço a professora Cláudia Eliane da Matta pela orientação, sem a qual este trabalho não se realizaria. Além do agradecimento ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Agradeço também aos meus colegas e veteranos Tales Renato de Lima Antônio e Tiago Dias de Souza pelo apoio, orientações e amizade durante a criação deste trabalho.

Referências

AKKAQUI, Raifa; STEFANOV, Alexandru; PALENSKY, Peter; EPEMA, Dick H. J. A taxonomy and lessons learned from blockchain adoption within the internet of energy paradigm. *IEEE Access*, Nova York, v. 10, p. 106708–106739, ISSN 2169-3536, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3212148. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9911641/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

AKOBENG, A. K. Understanding systematic reviews and meta-analysis. *Archives of Disease in Childhood*, Londres, v. 90, n. 8, p. 845–848, 2005. DOI: 10.1136/adc.2004.058230. Disponível em: <https://adc.bmj.com/lookup/doi/10.1136/adc.2004.058230>. Acesso em: 24 jan. 2024.

CAO, Zhiao; WANG, Jinkuan; ZHAO, Qiang; HAN, Yinghua; LI, Yuchun. Decarbonization scheduling strategy optimization for electricity-gas system considering electric vehicles and refined operation model of power-to-gas. *IEEE Access*, Nova York, v. 9, p. 5716–5733, ISSN 2169-3536, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048978. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9312594/>. Acesso em: 16 set. 2023.

HOLTTINEN, Hannele; KIVILUOMA, Juha; FLYNN, Damian; SMITH, J. Charles; ORTHS, Antje; ERIKSEN, Peter Borre; CUTULULIS, Nicolaos; SODER, Lennart; KORPAS, Magnus; ESTANQUEIRO, Ana; MACDOWELL, Jason; TUOHY, Aidan; VRANA, Til Kristian; O'MALLEY, Mark. System impact studies for near 100% renewable energy systems dominated by inverter based variable generation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Nova York, v. 37, n. 4, p. 3249–3258, ISSN 1558-0679, 2022. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3034924. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9246271/>. Acesso em: 16 set. 2023.

KEZ, Dlzar Al; FOLEY, Aoife M.; MORROW, D. John. Analysis of fast frequency response allocations in power systems with high system non-synchronous penetrations. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Nova York, v. 58, n. 3, p. 3087–3101, ISSN 1939-9367, 2022. DOI: 10.1109/TIA.2022.3160997. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9739850/>. Acesso em: 16 set. 2023.

LI, Shuangqi; ZHAO, Pengfei; GU, Chenghong; LI, Jianwei; CHENG, Shuang; XU, Minghao. Online battery protective energy management for energy-transportation nexus. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Nova York, v. 18, n. 11, p. 8203–8212, ISSN 1551-3203, 2022. DOI: 10.1109/TII.2022.3163778. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9745763/>. Acesso em: 16 set. 2023.

PUDJANTO, Danny; STRBAC, Goran. Whole system value of long-duration electricity storage in systems with high penetration of renewables. **iEnergy**, Nova York, v. 1, n. 1, p. 114–123, ISSN 2771-9197, 2022. DOI: 10.23919/IEN.2022.0004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9762239/>. Acesso em: 16 set. 2023.

RIVERA, Sebastian; GOETZ, Stefan M.; KOURO, Samir; LEHN, Peter W.; PATHMANATHAN, Mehanathan; BAUER, Pavol; MASTROMAURO, Rosa Anna. Charging infrastructure and grid integration for electromobility. **Proceedings of the IEEE**, Nova York, v. 111, n. 4, p. 371–396, ISSN 1558-2256, 2023. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3216362. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9940564/>. Acesso em: 16 set. 2023.

TIRUNAGARI, Sridevi; GU, Mingchen; MEEGAHAPOLA, Lasantha. Reaping the benefits of smart electric vehicle charging and vehicle-to-grid technologies: regulatory, policy and technical aspects. **IEEE Access**, Nova York, v. 10, p. 114657–114672, ISSN 2169-3536, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3217525. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9931106/>. Acesso em: 16 set. 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Sources of Greenhouse Gas Emissions**. 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 29 nov. 2023.

XIE, Le; ZHENG, Xiangtian; SUN, Yannan; HUANG, Tong; BRUTON, Tony. Massively digitized power grid: opportunities and challenges of use-inspired AI. **Proceedings of the IEEE**, Nova York, v. 111, n. 7, p. 762–787, ISSN 1558-2256, 2023. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3175070. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9803820/>. Acesso em: 16 set. 2023.

ZOGRAFOPOULOS, Ioannis; HATZIARGYRIOU, Nikos D.; KONSTANTINOU, Charalambos. Distributed energy resources cybersecurity outlook: vulnerabilities, attacks, impacts, and mitigations. **IEEE Systems Journal**, Nova York, v. 17, n. 4, p. 6695–6709, ISSN 1937-9234, 2023. DOI: 10.1109/JSYST.2023.3305757. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10238347/>. Acesso em: 6 jun. 2024.