

A transição do setor energético para energias renováveis: uma revisão sistemática sobre os impactos 3D na geração e transmissão elétrica

The energy sector transition to renewable energies: a systematic review about the impacts of 3D in energy generation and distribution

La transición del sector energético a las energías renovables: una revisión sistemática sobre los impactos 3D en la generación y transmisión eléctrica

Fernando Gonçalves Penna Neto¹
Cláudia Eliane da Matta²

Resumo: Este estudo realiza uma revisão sistemática e rastreamento de citações para investigar os impactos da descarbonização, digitalização e descentralização (3D) em sistemas elétricos e avaliar seus impactos, ao levar em consideração o objetivo global de minimizar mudanças climáticas. Foram identificados efeitos adversos causados pelas áreas de 3D, além de possíveis soluções para esses efeitos. Dentre as estratégias analisadas para mitigar esses impactos, destacam-se: formas de armazenamento energético, predição de fontes renováveis, controle da carga de veículos elétricos e melhorias na cibersegurança. Para todos esses itens, foram identificadas inovações em eficiência e segurança elaboradas para reduzir os impactos 3D nas redes elétricas.

Palavras-chave: Descarbonização. Digitalização. Descentralização. Revisão. Impactos.

Abstract: This study carries out a systematic review and citation tracking to investigate the impacts of decarbonization, digitalization and decentralization (3D) on electricity systems and assess their impacts, taking into account the global goal of minimizing climate change. Adverse effects caused by 3D areas were identified, as well as possible solutions to these effects. Among the strategies analyzed to mitigate these impacts are: forms of energy storage, prediction of renewable sources, electric vehicle load control and cybersecurity improvements. For all these items, innovations in efficiency and security designed to reduce 3D impacts on electricity grids were identified.

Keywords: Decarbonization. Digitalization. Decentralization. Review. Impacts.

¹Graduando em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Itajubá. <https://orcid.org/0009-0000-4190-600X>. E-mail: d2023001263@unifei.edu.br

² Doutora. Universidade Federal de Itajubá. <https://orcid.org/0000-0002-8939-3597>. E-mail: claudia.matta@unifei.edu.br.

Resumen: Este estudio lleva a cabo una revisión sistemática y un rastreo de citas para investigar los efectos de la descarbonización, la digitalización y la descentralización (3D) en los sistemas eléctricos y evaluar sus repercusiones, teniendo en cuenta el objetivo global de minimizar el cambio climático. Se identificaron los efectos adversos causados por las áreas 3D, así como las posibles soluciones a estos efectos. Entre las estrategias analizadas para mitigar estos impactos se encuentran: formas de almacenamiento de energía, predicción de fuentes renovables, control de carga de vehículos eléctricos y mejoras en la ciberseguridad. Para todos estos puntos, se identificaron innovaciones en eficiencia y seguridad diseñadas para reducir los impactos de las 3D en las redes eléctricas.

Palabras clave: Descarbonización. Digitalización. Descentralización. Revisión. Impactos.

Submetido 12/09/2024

Aceito 18/03/2025

Publicado 15/04/2025

Considerações iniciais

Esta pesquisa é fruto de uma iniciação científica e se insere no contexto das energias renováveis. As fontes de energia renováveis são soluções ecológicas e sustentáveis, alinhando-se ao consenso comum dos objetivos de desenvolvimento sustentável, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Os objetivos de desenvolvimento sustentável são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade.

A motivação para este estudo foi, especialmente, a sétima meta estabelecida pela ONU (*United Nations*, 2022), que visa a garantir acesso à energia para toda a população mundial; fazer a transição para as fontes de energia renovável, com a intenção de lidar com mudanças climáticas; e melhorar a eficiência energética da energia elétrica gerada.

Assim, o foco em reduzir a progressão das mudanças climáticas, causadas pelas emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), levou os países desenvolvidos a um aumento substancial nos investimentos em processos que limitam essas emissões, por exemplo, os investimentos em veículos elétricos, fontes de energia renovável e toda a infraestrutura necessária para integração de ambos na rede elétrica (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, 2023).

A transição do setor elétrico consiste na utilização de fontes de energia renováveis, tais como a energia solar e a eólica em substituição aos combustíveis fósseis para geração de energia elétrica, conforme afirma o Ministério de Minas e Energia (2023). Em 2023, a média mundial para geração com energias renováveis consiste em 15% da energia elétrica total produzida (Ministério de Minas e Energia, 2023). Nesse sentido, de acordo com a meta da ONU para 2030 (*United Nations*, 2022), ainda é necessário muito progresso a ser feito na transição para 100% de uso de energias renováveis, o que torna essencial, por exemplo, deixar mais acessíveis os custos de transporte e produção de placas solares, turbinas eólicas e biogás.

A transição do setor energético aborda conceitos, como descarbonização, descentralização e digitalização (3D). Esses três conceitos são os principais tópicos relacionados às mudanças no setor de energia e de como a humanidade lidará com as questões climáticas, isso porque o trabalho em conjunto desses três elementos possibilita a redução ou até completa a anulação das mudanças climáticas causadas por ações antrópicas (Rogelj *et al.*,

2016; Li, S. *et al.*, 2022). Entende-se ações antrópicas como ações feitas por seres humanos, associadas a modificações feitas perante a natureza.

A descarbonização é definida como o processo de redução das emissões de CO₂ ou outros GEE e inclui processos, como a adoção de veículos elétricos, sistemas de captura de carbono e utilização de fontes de energia renovável (Silvestre *et al.*, 2018).

A digitalização representa um conjunto específico de inovações de controle, incluindo a modernização de equipamentos com tecnologias digitais, que são consideradas necessárias para enfrentar os desafios trazidos pela descarbonização/descentralização, especialmente para ajudar a integrar e otimizar quantidades cada vez maiores de geração intermitente (Soutar, 2021), além da utilização de *softwares* e leituras de dados para gerenciar a distribuição ou a geração de energia elétrica, necessárias para lidar com a complexidade da geração de energia imprevisível proveniente de fontes renováveis (Strbac *et al.*, 2021).

A descentralização é a implementação de usinas de geração de menor escala – geralmente provenientes de geração fotovoltaica residencial –, capazes de atuar independentemente da rede elétrica principal de uma região e reduzir o estresse nesta, ao oferecer serviços complementares de geração (caracterizando um serviço ancilar) para ajudar a regular a qualidade da energia (Hernando-Gil *et al.*, 2022).

3D mudam fundamentalmente como a eletricidade é gerada e quão confiável e segura ela é: fazem a transição de geração à base de queima de combustíveis fósseis para geração com fontes renováveis; conectam todo o setor elétrico ao digitalizá-lo; reduzem o *stress* na rede elétrica com a descentralização (Bellizio *et al.*, 2023; Pudjianto; Strbac, 2022; Sahoo; Timmann, 2023).

A partir desse contexto, o presente estudo tem o objetivo de realizar uma revisão sistemática de literatura, por meio do rastreamento de citações, dos impactos das estratégias 3D na geração, na transmissão e na distribuição elétrica. Assim, busca responder à pergunta de pesquisa: “Quais são os impactos que os processos de 3D têm na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica e como esses impactos nas redes elétricas estão sendo mitigados?”.

O rastreamento de citações é uma técnica usada para encontrar outros trabalhos relevantes a uma pesquisa, centrando-se na procura por publicações no índice de citação de um

estudo base, que, no caso deste artigo, seriam os estudos encontrados com a revisão sistemática de literatura (Lefebvre *et al.*, 2023).

O desenvolvimento metodológico deste estudo teve como base a revisão sistemática da literatura em conjunto com um rastreamento de citações. A revisão foi realizada na base de dados *IEEE Xplore*³ do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). A escolha por essa plataforma se deu porque reúne mais de 6 milhões de documentos e outros materiais de publicações nas áreas de engenharia elétrica, eletrônica e ciência da computação (*Institute of Electrical And Electronics Engineers*, 2024a).

Nesta pesquisa, foi realizada uma análise de citações retroativas com foco na profundidade de um estudo. Isso significa que, após a seleção dos 17 estudos relevantes da base de dados IEEE, foram examinadas as referências citadas por esses trabalhos, com o objetivo de identificar fontes adicionais pertinentes à pesquisa. Essa estratégia permitiu uma análise focada nas referências mais diretamente relacionadas ao tema, garantindo um levantamento eficiente das principais contribuições científicas presentes na literatura existente (Lefebvre *et al.*, 2023).

A justificativa para esta pesquisa está no crescimento acelerado das fontes de energia renováveis em escala global, impulsionado, em parte, pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (Organização das Nações Unidas, 2022). Dado o impacto crescente dessas fontes sobre a infraestrutura elétrica mundial, torna-se essencial compreender as transformações que a transição energética causará na rede elétrica, destacando a relevância da análise proposta.

Durante a revisão sistemática da literatura deste trabalho, foram encontrados dois outros estudos que tratavam de temas semelhantes a esta pesquisa, sendo eles os artigos de Di Silvestre (2018) e Dong e Zhang (2021). Mesmo com a existência desses dois trabalhos, o presente estudo ainda consegue se manter relevante, pois apresenta dados mais recentes e trata de assuntos mais técnicos da 3D, sendo que Di Silvestre (2018) retrata mais as políticas que promovem os processos de 3D. Além do mais, apesar de este estudo apresentar uma proposta similar à de Dong e Zhang (2021), os autores não realizaram uma revisão sistemática de

³ <https://ieeexplore-ieee-org.ez38.periodicos.capes.gov.br/Xplore/guesthome.jsp>

literatura, o que diferencia os estudos o bastante para coexistirem e trazerem conclusões importantes à área.

Embora existam mecanismos 4D e 5D (digitalização, descarbonização, descentralização, desregulamentação e decréscimo de uso) na literatura (Wagner; Götz, 2021), o presente estudo focou exclusivamente em uma análise dos mecanismos 3D e seus impactos nos sistemas elétricos de potência.

Este trabalho teve como contribuição a elaboração de uma revisão sobre os impactos da 3D em processos de geração, transmissão e distribuição elétrica, principalmente devido à implementação de energias renováveis e veículos elétricos; também são apresentados achados de como esses impactos são minimizados; por fim, são delineadas perspectivas para o desenvolvimento futuro da área, com o intuito de fornecer subsídios para pesquisadores e profissionais interessados, facilitando a compreensão das transformações discutidas ao longo do estudo.

Dessa forma, na próxima seção, é apresentada a metodologia do trabalho; depois, são evidenciados os resultados e a discussão; e, por último, são feitas as considerações finais sobre este estudo.

Metodologia

Por meio da revisão sistemática de literatura, com rastreamento de citações, o presente estudo teve o objetivo de identificar publicações científicas que abordam o tema dos impactos da 3D nas redes elétricas – e como esses impactos estão sendo manejados.

Revisão sistemática da literatura

Nas palavras de Akobeng (2005), a revisão sistemática de literatura é uma forma de pesquisa que fornece um sumário de publicações sobre uma determinada questão de estudo, usando metodologias explícitas para procurar e sintetizar os seus achados. O autor também declarou que a revisão sistemática consiste em 8 passos principais, sendo dispostos a seguir: (1) declarar os objetivos da pesquisa e critérios de elegibilidade; (2) procurar por publicações que atendem aos critérios de elegibilidade; (3) tabular as características de cada publicação e avaliar suas características metodológicas; (4) aplicar os critérios de elegibilidade e justificar quaisquer exclusões; (5) reunir o conjunto de dados mais abrangente possível; (6) analisar os

resultados dos estudos elegíveis usando a síntese estatística dos dados, se apropriado e possível; (7) comparar análises alternativas, se apropriado e possível; (8) preparar um sumário da revisão ao reportar os resultados encontrados. Para este estudo, foram utilizados os passos 1, 2, 3, 4, 5 e 8.

Os passos 6 e 7 não se apresentaram apropriados para este artigo, pois dependem da realização de uma metanálise dos resultados dos estudos encontrados. A metanálise se baseia na análise estatística (útil quando a revisão sistemática se baseia em resultados numéricos) dos resultados encontrados (Akobeng, 2005), assim, fugindo do escopo desta revisão e não sendo útil.

Para este estudo, foi selecionada a base de dados *IEEE Xplore*, uma plataforma desenvolvida pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos. O uso de apenas uma base de dados para uma revisão faz com que outros estudos relevantes sejam deixados de fora, então várias bases de dados devem ser usadas para encontrar estudos relevantes, afirma Akobeng (2005). É por isso que, para compensar essa limitação, foi implementado, junto à revisão sistemática de literatura, o rastreamento de citações que consiste em encontrar outros trabalhos relevantes por meio do índice de citação de um estudo base (Lefebvre *et al.*, 2023).

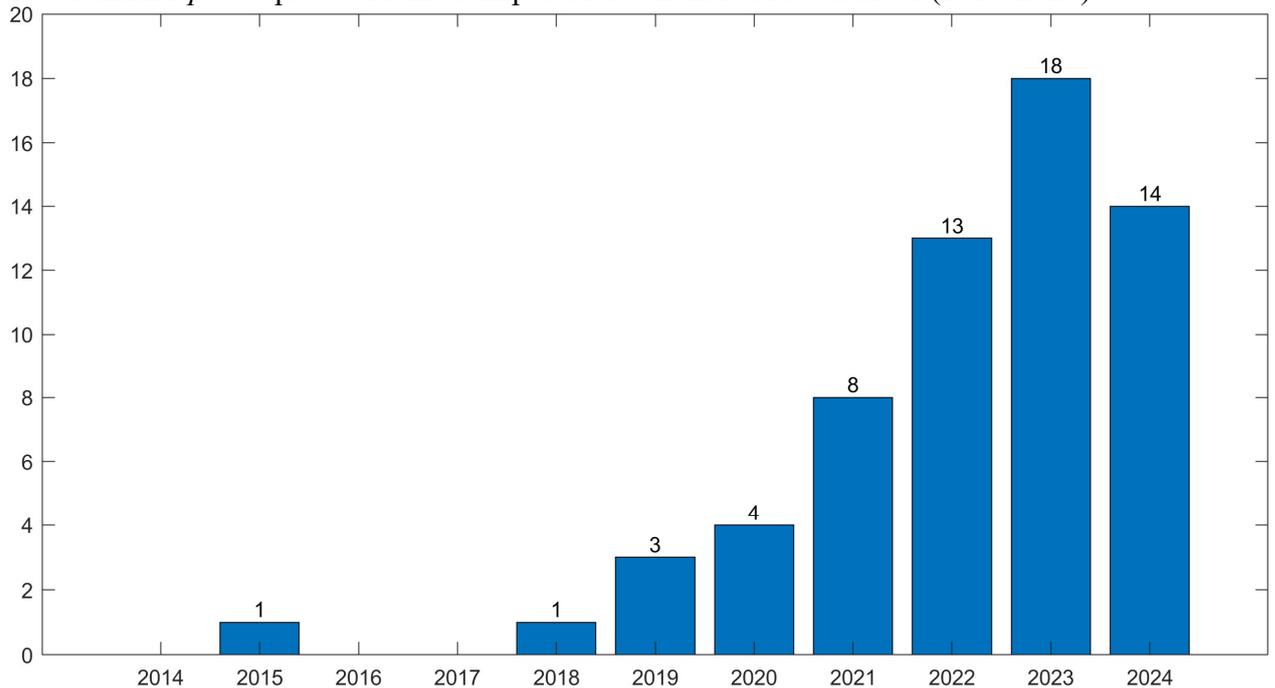
Seguindo as diretrizes de Akobeng (2005) e Lefebvre *et al.* (2023), esta revisão, conduzida de setembro de 2023 a maio de 2024, foi empregada para reunir informações sobre os impactos nas redes de energia causados pela 3D e como mitigar esses impactos.

Para os passos 1 e 2 da revisão, foi estabelecido o objetivo da pesquisa, que é responder à questão de: “Quais são os impactos que a 3D está causando nas redes elétricas e como esses impactos estão sendo mitigados?”. Foram, então, selecionados critérios iniciais de inclusão para obter uma seleção inicial de estudos. Esses critérios foram: (CI1) incluir somente artigos de periódicos científicos publicados no *IEEE Xplore* e (CI2) incluir somente publicações entre 2014 e 2024. Na análise do Gráfico 1, nota-se que a maioria das publicações feitas na área ocorreram no lapso temporal definido pela pesquisa, com um aumento crescente a partir de 2018.

Na busca na base de dados, foram utilizados os termos em inglês “*impacts AND (decarboni?ation OR decentrali?ation OR digitali?ation)*”, em que o símbolo “?” substitui um caractere (nesse caso, foi utilizado para buscar palavras com duas grafias – s e z), escrito na língua inglesa. Os operadores lógicos “AND” e “OR” adicionam condições de busca para a

presença dos termos utilizados. O operador “AND” verifica se ambos os termos adjacentes estão presentes na pesquisa, e o operador “OR” verifica se qualquer um dos termos adjacentes estão presentes na pesquisa.

Gráfico 1 – Resultado da revisão sistemática da literatura dos artigos publicados na base de dados *IEEE Xplore* que abordam os impactos da 3D nas redes elétricas (2014-2024)



Fonte: elaboração própria (2024).

Além disso, utilizou-se o filtro por tópicos, em que foram incluídas apenas publicações que se encaixavam nos tópicos de “rede elétrica”, “sistema elétrico”, “transformação digital”, “descarbonização” e “energia renovável”, do inglês “*power grid*”, “*power system*”, “*digital transformation*”, “*decarbonization*” e “*renewable energy*”, respectivamente, conforme mostra a Figura 1. O uso dos filtros por tópicos dentro do *IEEE Xplore* foi contemplado para aumentar a relevância das publicações mostradas ao limitar a procura para apenas publicações com temas relacionados à questão de estudo deste artigo.

Ao utilizar os termos de busca “*impacts AND (decarboni?ation OR decentrali?ation OR digitali?ation)*”, foram encontradas 1.334 publicações. Limitar a busca de 2014 a 2024 reduziu o número de publicações para 1244. Filtrar por artigos de periódicos reduziu esse

número para 170 publicações. Por último, o refinamento por tópicos reduziu as publicações a serem analisadas para 62.

Figura 1 – Exemplo da aba de filtro por tópicos sendo usada na pesquisa

Publication Topics ^

Enter Topics

- Internet Of Things (33)
- Digital Technologies (28)
- Power System (28)
- Digital Transformation (26)
- Greenhouse Gas (23)
- Smart Contracts (23)
- Supply Chain (22)
- Electric Vehicles (21)
- Renewable Energy (21)
- Decarbonization (16)
- Consensus Mechanism (15)
- Power Grid (15)
- Secret Key (15)

Fonte: *Institute of Electrical And Electronics Engineers* (2024b).

Com as 62 publicações, uma filtragem preliminar foi feita apenas lendo o título e resumos desses periódicos, assim removendo 25 itens que não estavam relacionados a esta pesquisa. Com isso, as 37 publicações resultantes foram classificadas entre os tópicos de descarbonização, digitalização ou descentralização; logo, foram tabeladas para serem comparadas (Tabela 1), seguindo o terceiro passo da revisão proposto por Akobeng (2005).

Com os 37 periódicos classificados e seguindo o quarto passo da revisão, uma segunda lista de critérios, desta vez de exclusão, foi elaborada para descartar estudos que não seriam úteis para esta pesquisa. Todos os estudos com a mesma classificação da Tabela 1 foram comparados entre si, e estudos que continham um ou mais de dois critérios de exclusão elaborados a seguir, codificados (CE1) e (CE2), foram retirados.

Tabela 1 – Tabulação dos tópicos de discussão de cada referência a ser avaliada

Referência	Ano	Descarbonização	Digitalização	Descentralização
Aderibole <i>et al.</i>	2020		×	×
Ahangar; Yew; Flynn	2023	×	×	
Akkaoui <i>et al.</i>	2022		×	×
Bellizio <i>et al.</i>	2023		×	×
Cao <i>et al.</i>	2021	×	×	
Chinaris <i>et al.</i>	2023	×		
Collados-Rodrigues <i>et al.</i>	2022	×		
Dong e Zhang	2021	×	×	×
Garroussi <i>et al.</i>	2023	×		
Holttinen <i>et al.</i>	2022	×		
Kez; Foley; Morrow	2022		×	
Koncar e Bayram	2021	×		
Kozhaya <i>et al.</i>	2021		×	
B. Li <i>et al.</i>	2022	×		
S. Li <i>et al.</i>	2022	×	×	×
Liu <i>et al.</i>	2024	×		×
Marot <i>et al.</i>	2022	×	×	
Mishra <i>et al.</i>	2024			×
Mousa; Mahmoud; Lehtonen	2024			×
Nelega <i>et al.</i>	2023		×	
Poudel <i>et al.</i>	2023		×	×
Pudjianto e Strbac	2022	×		
Rivera <i>et al.</i>	2023	×		
Sahoo e Timmann	2023	×		
Shefaei <i>et al.</i>	2022		×	
Somantri e Surendro	2024	×		
Song <i>et al.</i>	2022	×	×	
Song <i>et al.</i>	2023	×	×	
Taylor <i>et al.</i>	2021	×	×	
Turizo; Ramos; Celeita	2022		×	
Tirunagari; Gu; Meegahapola	2022		×	
Wang; Gu; Fang	2023	×		
Wang; Deason; Shittu	2024	×		
Wu <i>et al.</i>	2024	×		×
Xie <i>et al.</i>	2023		×	
Zeng <i>et al.</i>	2023		×	
Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou	2023		×	

Fonte: elaboração própria (2024).

O critério de exclusão CE1 se refere a estudos que responderam superficialmente, ou não responderam, à pergunta: “Quais são os impactos da 3D nas redes elétricas e como esses impactos estão sendo controlados?”. Ademais, o critério CE2 remete aos estudos com assunto

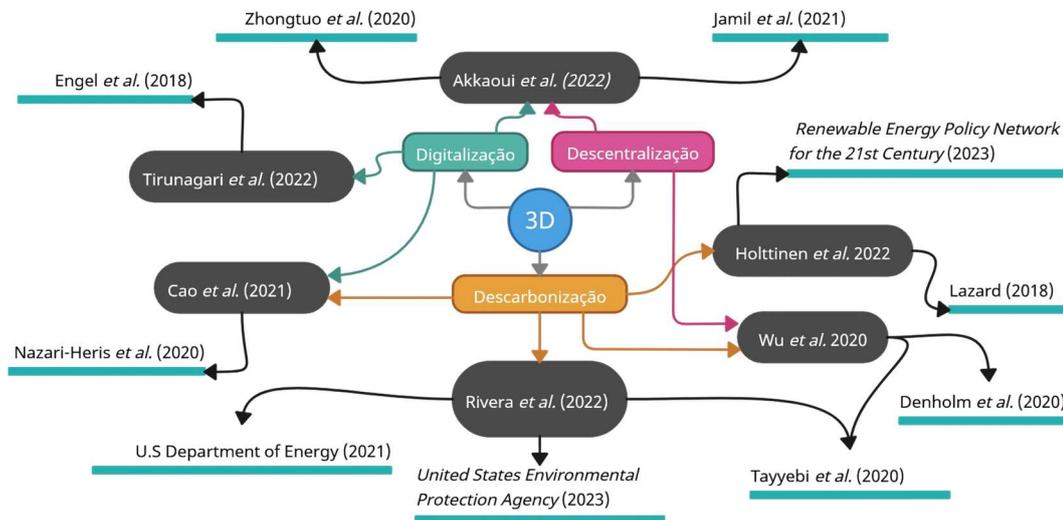
similar ou igual a outro estudo na mesma classificação (descarbonização, digitalização ou descentralização), mas que não responderam à pergunta, pois não tinham dados ou resultados relevantes, se comparados ao outro estudo de assunto similar ou igual. As publicações excluídas estão sombreadas na Tabela 1.

Destarte, 20 publicações foram eliminadas com base nas recomendações de Akobeng (2005). As justificativas para exclusão incluem: Aderibole *et al.* (2020) e Akkaoui *et al.* (2022) abordaram os mesmos temas (CE2); Koncar e Bayram (2021) discutiram os mesmos tópicos que Tirunagari, Gu e Meegahapola (2022) (CE2); Dong e Zhang (2021) trataram, de forma generalizada, todos os assuntos pertinentes à pesquisa (CE2). Os demais estudos foram excluídos por atenderem ao critério CE1.

Rastreamento de citações

O rastreamento de citações, também conhecido como análise de citações ou busca de referências citadas, refere-se a um método deliberado e sistemático de medir e avaliar o impacto de estudos de pesquisa ao longo do tempo, contando o número de vezes que um autor ou publicação foi citado em outros trabalhos (Mandal, 2017). Nos 17 estudos selecionados, realizou-se o rastreamento e, seguindo o princípio de abranger os dados adquiridos o máximo possível, presente no quinto passo de uma revisão sistemática, foi possível realizar um estudo mais aprofundado sobre os impactos da 3D na geração e na transmissão elétrica. A Figura 2 mostra as referências encontradas com o rastreamento de citações, além de seus respectivos artigos de origem.

Figura 2 – Mapa mental sobre o rastreamento das citações.



Fonte: elaboração própria (2025).

Inicialmente, foi utilizado o *software* livre *Systematic Review Accelerator* (SRA)⁴ (Clark *et al.*, 2020). O uso desse *software* se deve à sua capacidade de facilitar a procura por estudos no rastreamento de citações, ao juntar as referências do índice de citações de um grupo de estudos indicados, já removendo estudos duplicados, além de auxiliar na avaliação da elegibilidade para inclusão de um número grande de estudos. Essas funções são realizadas, respectivamente, pelas suas ferramentas intituladas “*spidercite*”⁵ e “*screenatron*”⁶, ambas de acesso livre. Um aspecto que notamos é que, devido à forma de como funciona a ferramenta “*spidercite*”, apenas artigos de periódicos foram utilizados nessa primeira seleção. Dessa maneira, outras formas de mídia que fazem parte do índice de citações dos estudos escolhidos serão inseridas mais adiante neste estudo.

Os filtros iniciais usados para o rastreamento de citações foram: (1) incluir somente estudos entre 2020 e 2024; (2) incluir somente artigos de periódicos; (3) remover estudos duplicados. Após essa exclusão, foi realizada uma leitura dos títulos e resumos dos estudos para análise da inclusão ou exclusão destes, conforme CE1. Permaneceram 69 estudos a partir desse critério de exclusão. Em seguida, semelhante ao que foi realizado no terceiro passo da revisão

⁴ <https://sr-accelerator.com/#/>

⁵ <https://sr-accelerator.com/#/spidercite>

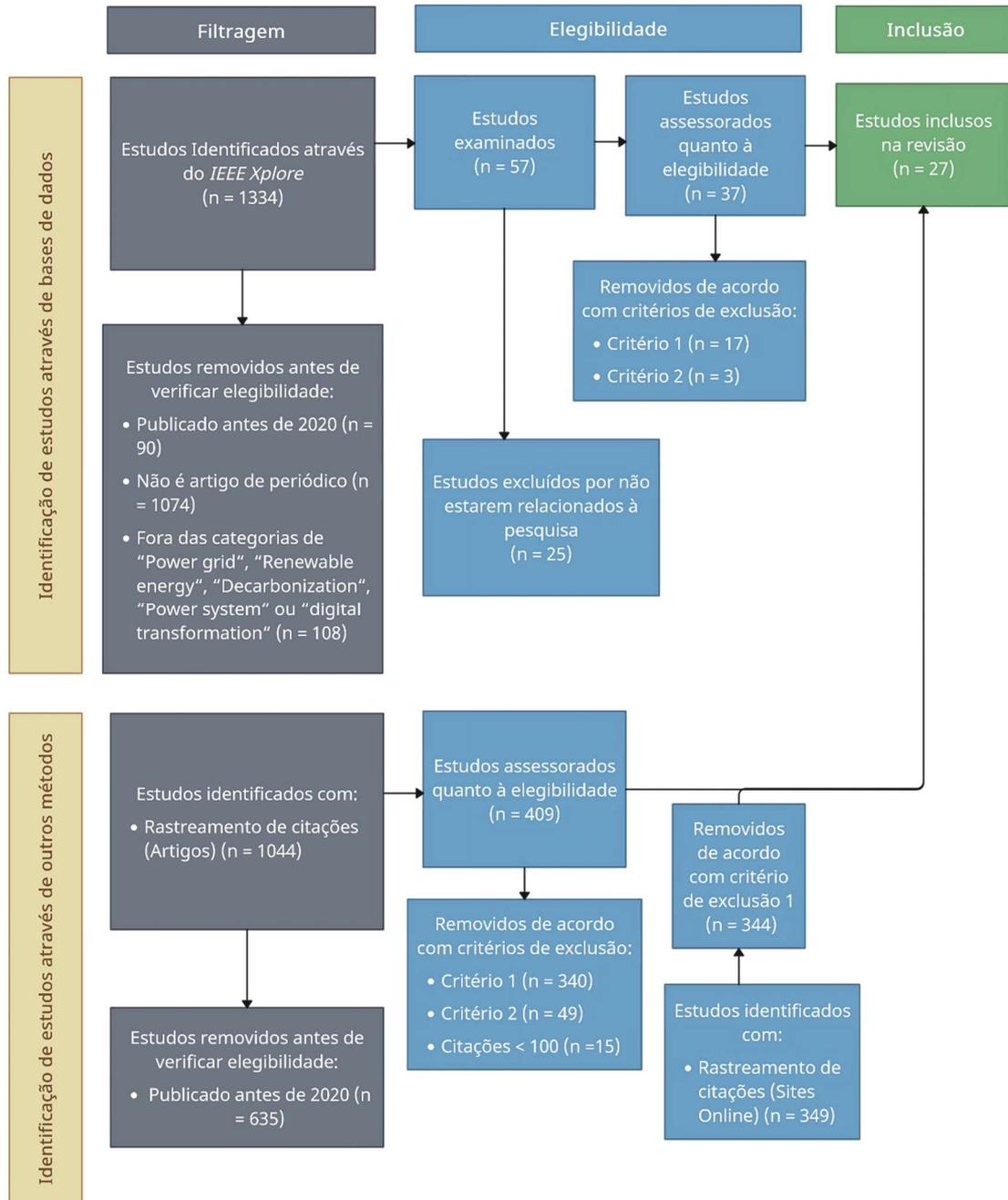
⁶ <https://sr-accelerator.com/#/screenatron>

sistemática da literatura, os estudos foram agrupados de acordo com os assuntos de descarbonização, digitalização e descentralização.

Os estudos com assuntos similares foram comparados entre si, seguindo o critério de exclusão CE2, da mesma forma realizada anteriormente na Tabela 1. Essas exclusões transformaram o número de referências adquiridas com a análise de citações de 69 para 20. Por último, foram removidos estudos com menos de 100 citações, para, assim, selecionar apenas aqueles com alta relevância nas áreas onde foram citados. Após isso, o número de referências foi de 20 para 5. Dessa quantidade, 2 dos artigos originaram do *IEEE Xplore*, 2 do *ScienceDirect* e 1 originou de uma publicação feita pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos (*National Renewable Energy Laboratory*); isso expande a visão do estudo, com êxito, ao incluir outras bases de dados.

Por fim, as referências não incluídas pelo “*spidercite*” foram avaliadas, principalmente dados de *sites on-line*. Esse passo resultou em 5 referências adicionais e incluídas. Isso totaliza o número de referências descobertas com o rastreamento de citações em 10. A Figura 3 expressa um resumo visual do processo de revisão sistemática, detalhando os passos tomados e os números de artigos excluídos ou selecionados neste trabalho.

Figura 3 – Representação visual do processo de revisão sistemática e rastreamento de citações



Fonte: elaboração própria (2024).

A próxima seção apresenta o último passo da revisão de literatura, conforme as diretrizes de Akobeng (2005), em que os resultados encontrados são sumarizados e apresentados.

Análise dos dados e resultados

Após analisar as 27 referências coletadas com a pesquisa sistemática da literatura e rastreamento de citações, 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

Descarbonizar economias traz questões, como: custos; problemas com balanceamento energético; imprevisibilidade de geração; possibilidades de apagões; e aumento na demanda energética devido ao uso de veículos elétricos (Holtinen *et al.*, 2022; Engel *et al.*, 2018). Trabalhar-se-á nesta seção como esses problemas estão sendo contornados – e o que eles significam para o futuro da descarbonização.

De acordo com *United States Environmental Protection Agency* (2023), o setor de energia elétrica contribui com 25% das emissões de GEE, conforme apresentado no Gráfico 2 (a). Esse setor se tornou um dos principais focos para a descarbonização. Com isso em vista, recentemente, com a diminuição dos custos para geração de energia elétrica a partir das fontes eólica e solar (Lazard, 2018), esses métodos de geração têm aumentado constantemente em popularidade, com um crescimento anual médio de geração renovável de 4,7% para o período de 2010 a 2020 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, 2023), o que auxilia nos esforços de descarbonização mundial.

Contudo, a substituição de usinas de energia, baseadas em combustíveis fósseis, por fontes renováveis, causa problemas relacionados à imprevisibilidade de geração e falta de inércia rotacional. Esta é respaldada na tendência de um eixo de um gerador de continuar a girar mesmo após o acontecimento de alguma mudança no sistema; assim, ela ajuda a manter a estabilidade do sistema em caso de variações súbitas na geração e consumo de energia elétrica. Dessa forma, o uso de geradores que necessitam de inversores para funcionar remove esse fator de equilíbrio, que é a inércia rotacional (Kez; Foley; Morrow, 2022; Tayyebi *et al.*, 2020). Todavia, como os inversores têm um tempo de resposta pequeno, o próprio uso deles já reduz a necessidade de tanta inércia rotacional no sistema, já que estes têm a capacidade de responder

imediatamente a desequilíbrios no sistema, realizando esse balanceamento necessário (Denholm *et al.*, 2020).

Mesmo assim, problemas, como: fluxo reverso nos sistemas de distribuição; variações de frequência/tensão; e apagões são todos efeitos possíveis da adoção de um sistema perto de 100% de implementação de energias renováveis, devido à falta de inércia rotacional (Holtinen *et al.*, 2022). Para combater isso, uma alternativa popular é usar inversores com uma resposta de acompanhamento de rede (*grid following response*), em que variações na frequência e tensão esperadas são corrigidas à medida que acontecem, para compensar as flutuações provenientes da geração renovável (Kez; Foley; Morrow, 2022).

No entanto, em sistemas próximos a 100% de geração de fontes de energia renovável, a resposta de acompanhamento se torna uma alternativa pouco confiável, dado o atraso intrínseco que existe entre detectar uma medida inesperada e realizar sua correção, além da instabilidade de um sistema de geração com alta participação de fontes renováveis. Portanto, operar com inversores formadores de rede (*grid forming response*) se torna a solução preferida (Kez; Foley; Morrow, 2022; Taeyybi *et al.*, 2020). Inversores formadores de rede atuam como fontes de tensão, regulando diretamente o sistema à sua volta em vez de tentar acompanhar o comportamento esperado para o sistema.

Com isso em mente, introduzir estratégias específicas de descarbonização, como as abordadas por Cao *et al.* (2021), torna-se muito benéfico. Essas estratégias para descarbonização, abordadas por esses autores, incluem: usos de sistemas de captura de carbono e energia para gás e veículo para rede (do inglês *vehicle-to-grid*), os quais contribuem para reduzir custos de operação, reduzir emissões de carbono e aumentar a utilização e eficiência de geração eólica. Sistemas de captura de carbono são estruturas que atuam na redução direta de emissões de CO₂ ao retirar esse composto da atmosfera – e são utilizados, principalmente, em geradores movidos a combustíveis fósseis; os outros conceitos mencionados serão abordados mais à frente neste estudo.

Outras questões relevantes na descarbonização envolvem a natureza imprevisível das fontes renováveis de energia e a adoção de veículos elétricos: quando ilhas geográficas optam por fazer a transição para esse tipo de geração, elas precisam considerar uma maior dependência da sua rede de energia nas redes de regiões vizinhas. Esse cenário ocorre, porque ilhas pequenas geralmente têm poucas usinas de geração baseadas em combustíveis fósseis. Portanto, ao

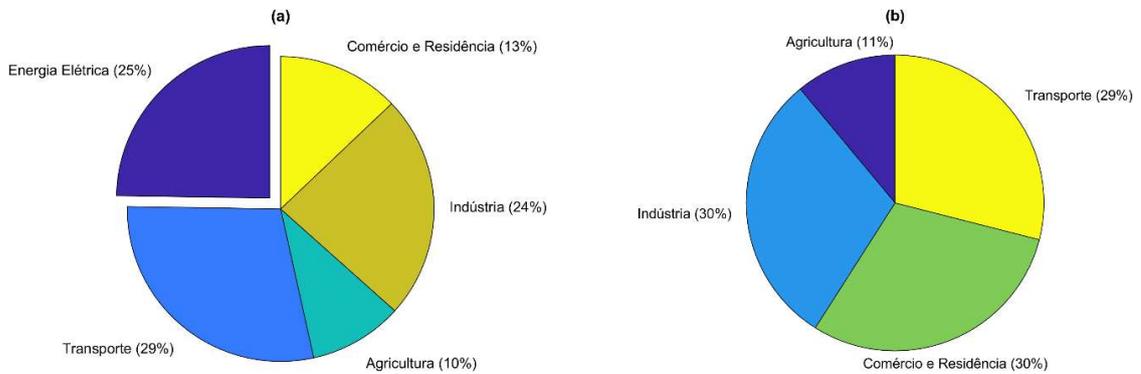
desativar, até mesmo, uma dessas usinas para dar lugar à geração sustentável, a rede elétrica da ilha pode ser, significativamente, afetada (Collados-Rodrigues *et al.*, 2022). Um exemplo disso concerne às Ilhas Baleares, onde uma segunda conexão de corrente contínua de alta tensão entre a rede elétrica principal da Espanha e dessas ilhas foi necessária para compensar a transição para energias renováveis (Collados-Rodriguez *et al.*, 2022).

A respeito de como a descarbonização afeta o setor de transporte, a substituição dos veículos à combustão por veículos elétricos ganha cada vez mais destaque na atualidade, devido aos benefícios associados à opção elétrica, o que aumenta, significativamente, as expectativas de penetração de veículos elétricos na economia (Tirunagari; Gu; Meegahapola, 2022). A autonomia dos veículos elétricos evolui, progressivamente, com os avanços na tecnologia das baterias e na eficiência dos próprios veículos (*U.S Department of Energy*, 2021).

Como podemos observar no Gráfico 2(a) e Gráfico 2(b), o transporte é responsável por 29% de todas as emissões diretas e indiretas associadas ao uso de energia elétrica. Isso evidencia a relevância de medidas externas para a descarbonização desse setor. Atualmente, com as emissões de GEE provenientes do transporte, representando, aproximadamente, 29% de todas as emissões nos Estados Unidos (Gráfico 2) (*United States Environmental Protection Agency*, 2021), é essencial analisar os impactos da transição para sistemas de transporte baseados em eletricidade, tanto na redução de GEE quanto nos desafios associados à geração e transmissão de energia elétrica.

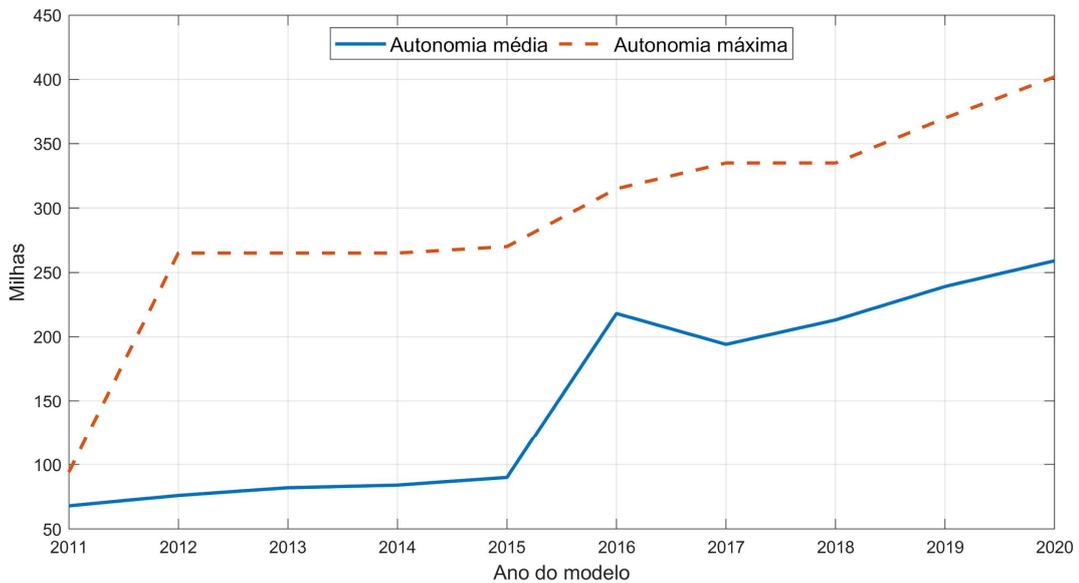
Ainda nessa vertente, um problema considerável dos veículos elétricos atuais é sua autonomia relativamente baixa, embora recentemente sua autonomia média tenha aumentado de forma considerável (*U.S Department of Energy*, 2021), conforme Gráfico 3. Isso significa que, futuramente, será possível que os veículos elétricos tenham tanta autonomia quanto os veículos com motores de combustão interna convencionais, o que estimula o uso dos elétricos e reduz as emissões provenientes do setor de transporte.

Gráfico 2 – Emissões de gases de efeito estufa dos Estados Unidos em 2022: (a) diretas e por setor econômico; (b) diretas e indiretas, devido ao uso da eletricidade, por setor econômico



Fonte: *United States Environmental Protection Agency* (2023).

Gráfico 3 – Gráfico de linhas que detalha aumentos na autonomia média e máxima dos veículos elétricos



Fonte: *U.S Department of Energy* (2021).

Ainda mais, os veículos elétricos têm a tendência de causarem impactos grandes nas redes de transmissão, como será explicado na seção seguinte sobre digitalização.

Digitalização

Seguindo o que foi introduzido na seção anterior, é importante considerar como a digitalização tem contribuído para superar desafios relacionados à integração de novos elementos nos sistemas elétricos de potência.

Um dos principais avanços proporcionados pela digitalização é o uso de dispositivos eletrônicos inteligentes, do inglês *Intelligent Electronic Device* (IED), que utilizam tecnologias de comunicação padrão, como DNP3 e IEC 61850, para se comunicar diretamente com os Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) (Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023). Esses dispositivos permitem o gerenciamento de fontes renováveis de energia, armazenamento e veículos elétricos, garantindo uma maior confiabilidade e estabilidade do sistema elétrico. São exemplos de IED os conversores eletrônicos de potência, utilizados para monitoramento e controle eficiente dos recursos energéticos.

No contexto dos veículos elétricos, o carregamento inteligente é um exemplo de como a digitalização pode mitigar problemas de qualidade de energia. Problemas, como: “[...] violações de tensão, desequilíbrio de tensão, quedas e aumentos de tensão a curto e longo prazo, fator de potência baixo, harmônicos e ‘flickers’” (Tirunagari; Gu; Meegahapola, 2022, p. 3) aparecem com a introdução dos veículos elétricos nas redes. Por meio da comunicação entre os carregadores dos veículos elétricos, que são um IED, e sistemas SCADA (Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023), é possível realizar o carregamento em momentos de baixa demanda, minimizando impactos, como desequilíbrio de tensão e harmônicos (Tirunagari; Gu; Meegahapola, 2022; Rivera *et al.*, 2023).

Além disso, algoritmos inteligentes podem ser utilizados para otimizar o carregamento dos veículos, considerando as condições da rede em tempo real (Tirunagari; Gu; Meegahapola, 2022; Rivera *et al.*, 2023). A digitalização também desempenha um papel crucial na integração de sistemas de armazenamento de energia. Tecnologias, como “energia para gás” e baterias de gravidade, dependem de soluções digitais para operarem de forma eficiente e integradas à rede elétrica (Sahoo; Timmann, 2023; Nazari-Heris *et al.*, 2020). Por exemplo, algoritmos de previsão podem ser utilizados para prever a geração de energia renovável, permitindo que os sistemas de armazenamento sejam acionados estrategicamente para equilibrar a oferta e a demanda.

No que diz respeito aos sistemas descentralizados, a digitalização é fundamental para garantir sua integração bem-sucedida com a rede principal. Isso inclui o uso de inversores inteligentes, que podem atuar em sincronia com a rede, e a análise de dados em grande escala para otimizar a distribuição de energia (Nelega *et al.*, 2023; Xie *et al.*, 2023). Ademais, a digitalização viabiliza a prestação de serviços ancilares por sistemas descentralizados, como o suporte à regulação de frequência e tensão (Wu *et al.*, 2024), o assunto a ser mencionado na próxima seção.

Descentralização

A geração descentralizada oferece serviços ancilares para a rede de distribuição principal e suporte para a geração de energia local, auxiliando a reduzir os efeitos negativos da utilização de fontes renováveis ou interrupções na transmissão elétrica (Bellizio *et al.*, 2023). Além desses serviços, para gerenciar com mais eficácia as frequências e os níveis de tensão nos sistemas elétricos, o armazenamento de eletricidade e regulação de demanda por eletricidade para sistemas com alta penetração de renováveis se torna essencial, atuando como estratégia de solução aos impactos da descarbonização.

É por isso que vários métodos de armazenamento e estratégias para regular a demanda de eletricidade foram desenvolvidos e avaliados na última década. Isso inclui: resposta à demanda (*demand response*); energia para gás (*power-to-gas*) e baterias de gravidade, todos os quais dependem da digitalização para funcionar de forma sincronizada com as demandas dos sistemas de energia (Sahoo; Timmann, 2023; Nazari-Heris *et al.*, 2020). Entretanto, como relatado por Poudel *et al.* (2023), quando diferentes controladores com objetivos divergentes tentam controlar um mesmo sistema ou dispositivo (armazenamento ou geração), comportamentos indesejados podem ocorrer, a exemplo das oscilações.

A energia para gás é baseada na conversão de água em hidrogênio e oxigênio por meio da eletrólise ou a produção de gás natural sintético por intermédio de reações químicas. Esses gases são produzidos quando existe um excesso de produção energética vinda de fontes renováveis e podem ser armazenados para combustão posterior; portanto, podem ser usados para fins de aquecimento ou geração de energia (Song *et al.*, 2023; Nazari-Heris *et al.*, 2020).

As baterias de gravidade se referem aos reservatórios de água das usinas hidrelétricas e usinas de bombeamento reversível, que convertem energia cinética em energia elétrica ao girar uma turbina (Sahoo; Timmann, 2023).

Focada mais na aplicação de serviços ancilares, a resposta à demanda é uma maneira de gerenciar a qualidade da energia, aumentando ou diminuindo o consumo de energia em uma região ou lugar, de maneira controlável, a partir de leituras da rede elétrica. Como essa resposta se baseia no uso de infraestrutura já existente, ela é vista como uma opção econômica para gerenciar a qualidade da energia nos sistemas com alta penetração de fontes renováveis, atuando na redução da demanda máxima no sistema de transmissão/geração elétrica e reduzindo as flutuações de frequência (Pudjianto; Strbac, 2022). Modelos para lidar com as dinâmicas complexas relacionadas a serviços ancilares estão em desenvolvimento, como o proposto por Zhongtuo *et al.* (2020).

Ademais, com a descentralização, surgem consumidores que realizam a própria geração de energia elétrica, chamados de “prosumidores” (uma junção da palavra ‘consumidor’ e ‘produtor’), capazes de gerar energia elétrica excedente e vendê-la para consumidores ou para a própria rede elétrica principal. Autores, como Jamil *et al.* (2021) e Akkaoui *et al.* (2022), discorrem sobre e propõem os mecanismos necessários para a troca de serviços de geração elétrica entre consumidores, prosumidores e a rede elétrica, garantindo privacidade e confiança nas transações por meio da tecnologia de *blockchain* (a mesma usada para gerenciar criptomoedas).

Outro impacto que a descentralização causa é a necessidade de assegurar a segurança dos sistemas. Em um ambiente digital, é de vital importância assegurar resiliência cibernética devido à necessidade de garantir o correto funcionamento dos processos envolvidos, protegendo o sistema de ciberataques e dando maior confiabilidade a ele (Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023).

Em sistemas descentralizados, isso se torna notável devido à maior vulnerabilidade a que esses sistemas expõem a rede. Ciberataques em redes descentralizadas podem ocorrer mais facilmente em razão da maior dependência dos sistemas aos dados de *feedback* trocados entre a geração própria de prosumidores, a rede principal e consumidores (Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023), como acontece com as interações presentes com o “mercado livre de energia”, em que os prosumidores podem vender seus excessos de produção

energética para a rede principal de distribuição ou para outros consumidores (Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023).

Com a introdução de microrredes, que representam um novo paradigma ao aproximar a geração elétrica do usuário final e integrar diferentes recursos energéticos distribuídos em uma entidade única e controlável, os sistemas se tornam mais eficientes e resilientes (Bellizio *et al.*, 2023; Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023). No entanto, suas características de operação e geração diversas tornam os sistemas mais suscetíveis a ciberataques; portanto, novas medidas de segurança estão sendo desenvolvidas para gerenciar esses ataques, mas ainda há melhorias significativas a serem feitas a esse respeito (Bellizio *et al.*, 2023; Zografopoulos; Hatziargyriou; Konstantinou, 2023).

Ainda sobre os veículos elétricos, embora possam perturbar o funcionamento adequado da rede elétrica com o carregamento descoordenado, existem tentativas de implementar serviços de “veículo para a rede” em microrredes – “veículo para a rede” consiste na utilização das baterias desses veículos para alimentar a rede, quando necessário, o que transforma os veículos elétricos em sistemas de armazenamento energético móveis e, assim, oferecem primariamente serviços ancilares para a rede de transmissão (Tirunagari; Gu; Meegahapola, 2022; Rivera *et al.*, 2023). Como estudado por S. Li *et al.* (2022), salientam-se dúvidas sobre quão confiável o “veículo para rede” pode ser quando implementado em microrredes, devido à instabilidade da geração delas. A propósito, o fato de as microrredes terem instabilidade em sua geração faz com que as baterias dos veículos elétricos, que estão conectados através de “veículo para rede”, percam expectativa de vida significativa, porém métodos para reduzir essa degradação da bateria foram desenvolvidos, como no caso de S. Li *et al.* (2022). Em pesquisa, S. Li *et al.* (2022) apresentaram quantificações de o quanto uma bateria é preservada ao seguir seu modelo proposto, com melhorias na *performance* das baterias testadas.

Antes de passar para as considerações finais deste estudo, uma breve sistematização dos achados obtidos é apresentada, demonstrando as relações e dissociações entre os tópicos da 3D. Essa sistematização é dividida em quatro tópicos evidenciados na sequência.

- Digitalização como facilitadora: a digitalização desempenha um papel fundamental ao habilitar a integração eficiente de tecnologias descentralizadas e renováveis; dispositivos eletrônicos inteligentes e sistemas SCADA, por exemplo, permitem

monitorar, controlar e otimizar a geração e consumo de energia descentralizada, viabilizando a descarbonização e descentralização.

- Descentralização como promotora da descarbonização: a descentralização, por meio de microrredes e geração distribuída, favorece a adoção de fontes renováveis, reduzindo emissões de GEE e contribuindo para a descarbonização da matriz energética.
- Impactos no gerenciamento da rede: a descentralização pode introduzir desafios à qualidade da energia e à estabilidade da rede, especialmente se a digitalização não for plenamente implementada ou se os protocolos de comunicação não forem robustos.
- Segurança cibernética como um ponto crítico: a digitalização, ao mesmo tempo em que habilita o controle das redes descentralizadas, aumenta a exposição a riscos de cibersegurança, criando uma tensão entre os benefícios e os desafios introduzidos por esses processos.

Considerações finais

Este estudo, em busca de consolidar uma melhor compreensão dos impactos nas redes de energia elétrica causados pela 3D, fez as seguintes observações:

muitos esforços para descarbonizar a economia global estão atualmente em andamento, mais notavelmente a transição para geração renovável, a transição para veículos elétricos e o aumento da presença de geração descentralizada;

os veículos elétricos ajudam nos esforços de descarbonização, abrindo a possibilidade de reduzir as atuais emissões de GEE do setor de transporte que estão na faixa de 29%. Além disso, esses veículos estão se tornando mais populares. No entanto, se o carregamento de suas baterias não for gerenciado corretamente, podem surgir problemas relacionados à degradação da qualidade energética da rede de transmissão;

o armazenamento de energia é de grande importância para equilibrar a geração de energia a partir de fontes renováveis, com métodos diferentes de armazenamento sendo usados para diferentes propósitos (equilíbrio a curto ou longo prazo);

a descentralização tem previsão de aumentar nos próximos anos, com formação de microrredes, fornecimento de serviços ancilares e um aumento na geração local. Trata-se de fatores que ajudarão no gerenciamento da qualidade da energia na rede principal e redução de custos;

o aumento no número dos sistemas descentralizados introduz pontos fracos na segurança cibernética dos sistemas de energia, devido às trocas de informações necessárias com a rede principal para regular a geração e transmissão de energia;

devido à 3D, uma tendência para um futuro mais sustentável é visível, com muitos esforços realizados em diversos setores para acomodar as mudanças necessárias nessa transição. Dessa forma, a incapacidade de acomodar essas mudanças pode comprometer a viabilidade da transição para um futuro mais sustentável.

Pode-se depreender, então, que o objetivo definido na introdução do artigo foi alcançado com êxito, com os impactos causados nos sistemas elétricos pela 3D sendo claramente evidenciados e discutidos.

A partir desses resultados, os seguintes caminhos de pesquisa são sugeridos para ampliar o conhecimento sobre os impactos da 3D nos sistemas elétricos: em termos de cibersegurança, mais modelos que detectam, previnem e lidam com ciberataques podem ser elaborados. Também é necessário o desenvolvimento de normas e padrões de segurança para as interações entre microrredes e o sistema de transmissão.

Este estudo trouxe uma visão mais clara de vários aspectos em relação à dinâmica entre as redes de energia e a 3D, contribuindo para estudos futuros que precisarão reunir uma compreensão geral das implicações da 3D nas redes elétricas nos próximos anos. Pesquisas futuras podem explorar, com maior profundidade, os aspectos destacados e contribuir para o avanço dessa área essencial ao desenvolvimento sustentável. Apesar das contribuições relevantes deste trabalho, metodologicamente, a revisão sistemática enfrenta limitações, como o uso de apenas uma base de dados. Destarte, como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o número de bases de dados.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Referências

ADERIBOLE, Adedayo; ALJARWAN, Aamna; UR REHMAN, Muhammad Habib; ZEINELDIN, Hatem H.; MEZHER, Toufic; SALAH, Khaled; DAMIANI, Ernesto; SVETINOVIC, Davor. Blockchain technology for smart grids: decentralized NIST conceptual model. **IEEE Access**, Nova York, v. 8, p. 43177–43190, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977149. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9018104/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

AKKAOUI, 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, 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.

BELLIZIO, Federica; XU, Wangkun; QIU, Dawei; YE, Yujian; PAPADASKALOPOULOS, Dimitrios; CREMER, Jochen L.; TENG, Fei; STRBAC, Goran. Transition to digitalized paradigms for security control and decentralized electricity market. **Proceedings of the IEEE**, Nova York, v. 111, n. 7, p. 744–761, 2023. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3161053. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9756414/>. Acesso em: 16 set. 2023.

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, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048978. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9312594/>. Acesso em: 16 set. 2023.

CLARK, Justin; GLASZIOU, Paul; DEL MAR, Chris; BANNACH-BROWN, Alexandra; STEHLIK, Paulina; SCOTT, Anna Mae. A full systematic review was completed in 2 weeks using automation tools: a case study. **Journal of Clinical Epidemiology**, Amsterdã, v. 121, p. 81–90, 2020. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2020.01.008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089543561930719X>. Acesso em: 4 mar. 2024.

COLLADOS-RODRIGUEZ, Carlos; CHEAH-MANE, Marc; CIFUENTES-GARCIA, Francisco; PRIETO-ARAUJO, Eduardo; GOMIS-BELLMUNT, Oriol; CORONADO, Luis; LONGAS, Carmen; SANZ, Silvia; MARTIN, Macarena; CORDON, Antonio. Integration of an MMC-HVDC link to the existing LCC-HVDC link in balearic islands based on grid-following and grid-forming operation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Nova York, v. 37, n. 6, p. 5278–5288, 2022. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3175251. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9775608/>. Acesso em: 16 set. 2023.

DENHOLM, P.; MAI, T.; KENYON, RW.; KROPOSKI, B.; O'MALLEY, M. **Inertia and the power grid: a guide without the spin.** Golden: National Renewable Energy Laboratory, mai. 2020. DOI: 10.2172/1659820. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2172/1659820>. Acesso em: 25 jun. 2024.

DI SILVESTRE, Maria Luisa; FAVUZZA, Salvatore; SANSEVERINO, Eleonora Riva; ZIZZO, Gaetano. How decarbonization, digitalization and decentralization are changing key power infrastructures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 93, p. 483–498, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.068. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032118304283>. Acesso em: 16 jan. 2024.

DONG, Zhao Yang; ZHANG, Yuchen. Interdisciplinary vision of the digitalized future energy systems. **IEEE Open Access Journal of Power and Energy**, Nova York, v. 8, p. 557–569, 2021. DOI: 10.1109/OAJPE.2021.3108937. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9536502/>. Acesso em: 16 set. 2023.

U.S DEPARTMENT OF ENERGY. Median driving range of all-electric vehicles tops 250 miles for model year 2020. **EERE**, Washington: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2021. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1167-january-4-2021-median-driving-range-all-electric-vehicles-tops-250>. Acesso em: 11 nov. 2023.

ENGEL, Hauke; HENSLEY, Russell; KNUPFER, Stefan; SAHDEV, Shivika. How electric vehicles could change the load curve. **Mckinsey**, Nova York: Mckinsey & Company, 2018. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-potential-impact-of-electric-vehicles-on-global-energy-systems>. Acesso em: 28 jan. 2024.

HERNANDO-GIL, Ignacio; ZHANG, Zhipeng; NDAWULA, Mike; DJOKIC, Sasa. DG Locational Incremental Contribution to Grid Supply Level. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Nova York, v. 58, n. 1, p. 5–14, 2022. DOI: 10.1109/TIA.2021.3118337. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9562294/>. Acesso em: 16 set. 2023.

HOLTINEN, 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, 2022. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3034924. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9246271/>. Acesso em: 16 set. 2023.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **About IEEE Xplore**, 2024a. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplorehelp/overview-of-ieee-xplore/about-ieee-xplore>. Acesso em: 18 jun. 2024.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **Search result**, 2024b. Disponível em:

[https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=impacts%20AND%20\(decarboni%3Fation%20OR%20decentrali%3Fation%20OR%20digitali%3Fation\)](https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=impacts%20AND%20(decarboni%3Fation%20OR%20decentrali%3Fation%20OR%20digitali%3Fation)).

Acesso em: 25 dez. 2024.

JAMIL, F.; IQBAL, N.; IMRAN; AHMAD, S.; KIM, D. Peer-to-peer energy trading mechanism based on blockchain and machine learning for sustainable electrical power supply in smart grid. **IEEE Access**, Nova York, v. 9, p. 39193-39217, 2021. DOI:

10.1109/access.2021.3060457. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9358144>.

Acesso em: 25 jun. 2024.

KEZ, Dizar 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, 2022. DOI:

10.1109/TIA.2022.3160997. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9739850/>.

Acesso em: 16 set. 2023.

KONCAR, Ilija; BAYRAM, I. Safak. A probabilistic methodology to quantify the impacts of cold weather on electric vehicle demand: a case study in the U.K. **IEEE Access**, Nova York, v. 9, p. 88205-88216, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3090534. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9459753/>. Acesso em: 16 set. 2023.

LAZARD. Levelized cost of energy and levelized cost of storage 2018. **Lazard**, 2018.

Disponível em: <https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2018/>. Acesso em: 4 nov. 2023.

LEFEBVRE, Carol; GLANVILLE, Julie; BRISCOE, Simon; FEATHERSTONE, Robin; LITTLEWOOD, Anne; METZENDORF, Maria-Inti; NOEL-STORR, Anna; PAYNTER, Robin; RADER, Tamara; THOMAS, James; WIELAND, L. Susan. Technical Supplement to Chapter 4: Searching for and selecting studies. In: HIGGINS, Julian P. T.; THOMAS, James; CHANDLER, Jacqueline; CUMPSTON, Miranda; LI, Tianjin; PAGE, Matthew J.; WELCH; Vivian A (ed.). *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. Version 6.4.

Cochrane, Londres, 2023. Disponível em: www.training.cochrane.org/handbook. Acesso em: 5 fev. 2024.

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, 2022. DOI: 10.1109/TII.2022.3163778. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9745763/>.

Acesso em: 16 set. 2023.

MANDAL, Nitai. An approach towards citation tracking: special reference to academic and research libraries. **International Journal of Information Movement**, Londres, v. 2, n. 8, p. 148-152, dec. 2017. Disponível em: <https://www.ijim.in/paper-23-an-approach-towards-citation-tracking-special-reference-to-academic-and-research-libraries/>. Acesso em: 17 jul. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Transição energética: a mudança de energia que o planeta precisa**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/transicao-energetica-a-mudanca-de-energia-que-o-planeta-precisa>. Acesso em: 27 fev. 2024.

NAZARI-HERIS, Morteza; MIRZAEI, Mohammad Amin; MOHAMMADI-IVATLOO, Behnam; MARZBAND, Mousa; ASADI, Somayeh. Economic-environmental effect of power to gas technology in coupled electricity and gas systems with price-responsive shiftable loads. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 244, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118769. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261933639X>. Acesso em: 9 fev. 2024.

NELEGA, Raluca; GREU, Dan Ioan; JECAN, Eusebiu; REDNIC, Vasile; ZAMFIRESCU, Ciprian; PUSCHITA, Emanuel; TURCU, Romulus Valeriu Flaviu. Prediction of power generation of a photovoltaic power plant based on neural networks. **IEEE Access**, Nova York, v. 11, p. 20713–20724, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3249484. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10054046/>. Acesso em: 16 set. 2023.

POUDEL, Shiva; BLACK, Gary D.; MUKHERJEE, Monish; REIMAN, Andrew P. Multi-objective power distribution operations: characterizing conflict and system volatility. **IEEE Access**, Nova York, v. 11, p. 103881–103889, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3318267. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10261170/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

PUDJIANTO, 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, 2022. DOI: 10.23919/IEN.2022.0004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9762239/>. Acesso em: 16 set. 2023.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY (REN21). **Renewables 2023 Global Status Report: global overview**, 2023. Disponível em: https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/global_overview/. Acesso em: 15 jan. 2024.

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, 2023. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3216362. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9940564/>. Acesso em: 16 set. 2023.

ROGELJ, Joeri; ELZEN, Michel Den; HÖHNE, Niklas; FRANSEN, Taryn; FEKETE, Hanna; WINKLER, Harald; SCHAEFFER, Roberto; SHA, Fu; RIAHI, Keywan;

MEINSHAUSEN, Malte. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. **Nature**, Londres, v. 534, n. 7609, p. 631–639, 2016. DOI: 10.1038/nature18307. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature18307>. Acesso em: 19 out. 2023.

SAHOO, Subrat; TIMMANN, Pascal. Energy Storage Technologies for Modern Power Systems: A detailed analysis of functionalities, potentials, and impacts. **IEEE Access**, Nova York, v. 11, p. 49689–49729, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3274504. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10121760/>. Acesso em: 16 set. 2023.

SONG, Jie; HE, Guannan; WANG, Jianxiao; ZHANG, Pingwen. Shaping future low-carbon energy and transportation systems: Digital technologies and applications. **iEnergy**, Nova York, v. 1, n. 3, p. 285–305, 2022. DOI: 10.23919/IEN.2022.0040. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9954284/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

SONG, Yonghua; SHAHIDEHPOUR, Mohammad; RAHMAN, Saifur; BRANDON, Nigel; KAI, Strunz; LIN, Jin; ZHAO, Yuxuan. Utilization of energy storage and hydrogen in power and energy systems: viewpoints from five aspects. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, Nova York, v. 9, n.1 , p. 1-7, 2023. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2022.08320. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10026205>. Acesso em: 16 set. 2023.

SOUTAR, Iain. Dancing with complexity: Making sense of decarbonisation, decentralisation, digitalisation and democratisation. **Energy Research & Social Science**, v. 80, n. 102230, 2021. DOI 10.1016/j.erss.2021.102230. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214629621003236>. Acesso em: 5 jan. 2025.

STRBAC, Goran; PAPADASKALOPOULOS, Dimitrios; CHRYSANTHOPOULOS, Nikolaos; ESTANQUEIRO, Ana; ALGARVIO, Hugo; LOPES, Fernando; DE VRIES, Laurens; MORALES-ESPANA, German; SIJM, Jos; HERNANDEZ-SERNA, Ricardo; KIVILUOMA, Juha; HELISTO, Niina. Decarbonization of electricity systems in europe: market design challenges. **IEEE Power and Energy Magazine**, Nova York, v. 19, n. 1, p. 53–63, 2021. DOI 10.1109/MPE.2020.3033397. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9318571/>. Acesso em: 9 fev. 2024.

TAYYEBI, Ali; GROSS, Dominic; ANTA, Adolfo; KUPZOG, Friederich; DORFLER, Florian. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, Nova York, v. 8, n. 2, p. 1004–1018, 2020. DOI: 10.1109/JESTPE.2020.2966524. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8959148/>. Acesso em: 9 fev. 2024.

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, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3217525. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9931106/>. Acesso em: 16 set. 2023.

UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report 2022**. 2022. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2024.

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.

WAGNER, O.; GÖTZ, T. Presentation of the 5Ds in Energy Policy: A Policy Paper to Show How Germany Can Regain Its Role as a Pioneer in Energy Policy. **Energies**, v. 14, n. 20, 18 out. 2021. DOI: 10.3390/en14206799. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6799>. Acesso em: 7 jan. 2025.

WU, Dan; SEO, Gab-Su; XU, Lie; SU, Chi; KOCEWIAK, Lukasz; SUN, Yin; QIN, Zian. Grid integration of offshore wind power: standards, control, power quality and transmission. **IEEE Open Journal of Power Electronics**, Nova York, v. 5, p. 583–604, 2024. DOI: 10.1109/OJPEL.2024.3390417. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10504957/>. Acesso em: 6 jun. 2024.

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, 2023. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3175070. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9803820/>. Acesso em: 16 set. 2023.

ZHONGTUO, S.; YAO, W.; ZHOUPING, L.; ZENG, L.; ZHAO, Y.; ZHANG, R.; TANG, Y.; WEN, J. Artificial intelligence techniques for stability analysis and control in smart grids: Methodologies, applications, challenges and future directions. **Applied Energy**, Amsterdã, v. 278, p. 1-25, nov. 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115733. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920312228>. Acesso em: 25 jun. 2024.

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. DOI: 10.1109/JSYST.2023.3305757. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10238347/>. Acesso em: 6 jun. 2024.