



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JARDEL DE QUEIROZ JUVÊNIO

ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADA A
VEÍCULOS AUTOMOTORES

FORTALEZA
2024

JARDEL DE QUEIROZ JUVÊNIO

ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADA A
VEÍCULOS AUTOMOTORES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- J98e Juvêncio, Jardel.
Estudo bibliométrico de análise de ciclo de vida aplicada a veículos automotores / Jardel Juvêncio. – 2024.
41 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.
1. Análise Bibliométrica. 2. Análise de Ciclo de Vida. 3. Veículos Elétricos. 4. Veículos a Célula de Combustível. 5. Veículos Híbridos. I. Título.

CDD 620.1

JARDEL DE QUEIROZ JUVÊNIO

ESTUDO BIBLIOMÉTRICO DE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA APLICADA A
VEÍCULOS AUTOMOTORES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em: 16/07/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, por guiar meus passos e tornar tudo possível A os meus pais, pelo amor e sacrifício que me guiaram. À minha mulher, pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis. A os meus filhos, cuja alegria renova minha determinação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Universidade Federal do Ceará (UFC) pelos conhecimentos e competências que facilitaram a pesquisa, com toda sua infraestrutura, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

RESUMO

Este estudo apresentou uma análise bibliométrica de artigos sobre a Análise de Ciclo de Vida (ACV) de veículos automotores publicados nos últimos 20 anos. A análise bibliométrica, uma disciplina da cienciometria, utiliza métodos matemáticos e estatísticos para avaliar publicações científicas, identificando tendências e estruturas em áreas de pesquisa específicas. Utilizando dados da Scopus e Web of Science, a análise avaliou o impacto e as tendências da produção científica, correlacionando palavras-chave para explorar conexões entre temas. Foram analisados 512 artigos das últimas duas décadas utilizando o algoritmo Bibliometrix em R, revelando um aumento significativo na produção de pesquisa nesta área, evidenciado pelo crescimento no número de artigos publicados e citações recebidas. Além disso, observou-se uma correlação entre a produção científica e as políticas públicas relacionadas ao hidrogênio, com destaque para iniciativas em países como Estados Unidos, China, Alemanha, Japão e Coreia do Sul, que têm promovido a transição para tecnologias mais sustentáveis. Este estudo revelou tendências importantes e orientará futuras inovações nos setores ambiental e de transportes, destacando a transição para opções mais sustentáveis. O trabalho forneceu esclarecimentos sobre o ciclo de vida de veículos com diversas tecnologias de propulsão, enfatizando a evolução e os impactos ambientais de veículos elétricos, híbridos, a combustão interna e a célula de combustível.

Palavras-chave: análise bibliométrica; análise de ciclo de vida; veículos a combustão interna; veículos híbridos; veículos elétricos; veículos a célula de combustível.

ABSTRACT

This study presented a bibliometric analysis of articles on the Life Cycle Assessment (LCA) of motor vehicles published over the past 20 years. Bibliometric analysis, a discipline of scientometrics, uses mathematical and statistical methods to evaluate scientific publications, identifying trends and structures in specific research fields. Using data from Scopus and Web of Science, the analysis assessed the impact and trends of scientific production, correlating keywords to explore connections between themes. A total of 512 articles from the last two decades were analyzed using the Bibliometrix algorithm in R, revealing a significant increase in research output in this area, evidenced by the substantial growth in the number of published articles and citations received. Additionally, a correlation was observed between scientific production and public policies related to hydrogen, highlighting initiatives in countries such as the United States, China, Germany, Japan, and South Korea, which have been promoting the transition to more sustainable technologies. This study uncovered important trends and guides future innovations in the environmental and transportation sectors, highlighting the transition to more sustainable options. The work provided valuable insights into the life cycle of vehicles with various propulsion technologies, emphasizing the evolution and environmental impacts of electric, hybrid, internal combustion, and fuel cell vehicles.

Keywords: bibliometric analysis; life cycle assessment; internal combustion vehicles; hybrid vehicles; electric vehicles; fuel cell vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do número de artigos publicados por ano	25
Figura 2 – Evolução do número de citações por ano	26
Figura 3 – Palavras-chave por ano	28
Figura 4 – Visualização de redes de palavras-chave	29
Figura 5 – Mapa de produção científica mundial	31
Figura 6 – Número de artigos por país	32
Figura 7 – Número de citações por país	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações de pesquisa	23
Tabela 2 – Produção científica no últimos 10 anos	24
Tabela 3 – Palavras-chave mais relevantes nos últimos 10 anos	27
Tabela 4 – Países com maior número de artigos	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
CBIO	Créditos de Descarbonização
Conpet	Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural
COP	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
GEE	Gases de Efeito Estufa
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MCI	Motores de Combustão Interna
MCP	<i>Multiple Country Publications</i>
MCS	Média de Citações
P	Número de Artigos
PBE Veicular	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PNH2	Programa Nacional de Hidrogênio
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
Proconve	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PróAlcool	Programa Nacional do Alcool
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i>
SCP	<i>Single Country Publication</i>
TCS	Número de Citações
TTW	<i>Tank-to-Wheel</i>
VCC	Veículos a Células de Combustível
VEB	Veículos Elétricos a Bateria
WoS	<i>Web of Science</i>
WTT	<i>Well-to-Tank</i>
WTW	<i>Well-to-Wheel</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	JUSTIFICATIVA	14
3	OBJETIVOS	17
3.1	Objetivo geral	17
3.2	Objetivos específicos	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Análise de Ciclo de Vida	18
4.1.1	Aplicação de Análise de Ciclo de Vida em Veículos Automotivos	19
4.2	Análise Bibliométrica	21
5	METODOLOGIA	23
5.1	Análise Bibliométrica	23
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6.1	Análise Bibliométrica	24
7	CONCLUSÃO	34
8	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, muitos países têm discutido planos e objetivos para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O Pacto de Glasgow, um compromisso estabelecido na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP) em novembro de 2021, reafirmou a necessidade de limitar o aumento da temperatura média global em 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais; reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) em relação aos níveis de 2010 até 2030 e neutralizá-las até o meio deste século, o que diminuiria significativamente os riscos e os impactos da mudança climática (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, 2021). A adoção de fontes renováveis em vez de combustíveis fósseis é um ponto crucial proposto pelo acordo.

A transição energética proposta depende do desenvolvimento de soluções de energia limpa e da busca por uma fonte de energia que atenda a requisitos como sustentabilidade, abundância e viabilidade econômica. O hidrogênio, como um vetor energético, tem a capacidade de superar as barreiras e os desafios que acompanham essa transição. Além disso, o hidrogênio tem a capacidade de aumentar a resiliência e a segurança do sistema energético por meio do processo de eletrificação. Funciona como um distribuidor de energia entre os setores de transporte, elétrico, industrial e residencial devido à sua flexibilidade. Até 2050, o hidrogênio pode evitar a emissão acumulada de 80 gigatoneladas de dióxido de carbono (*Hydrogen Council*, 2021).

A transição energética pretendida depende da infraestrutura e tecnologias utilizadas na cadeia de suprimentos do hidrogênio. Algumas dessas tecnologias já estão disponíveis, mas há muitas incertezas. Os obstáculos a serem abordados incluem altos custos de investimento e operação, falta de infraestrutura, políticas e regulamentos. Para reduzir tais obstáculos, é necessário desenvolver estudos, *roadmaps* e cenários regionais, nacionais e internacionais para determinar o que é necessário para acelerar a implementação de tecnologias e mostrar a adequabilidade da infraestrutura, embasando as partes interessadas nas tomadas de decisão.

Particularmente, as emissões de gases de efeito estufa tem impulsionado essa transição no setor de transportes através do processo da eletrificação dos veículos automotores. Os veículos elétricos a bateria e a célula de combustível são as tecnologias expoentes na eletrificação do setor. Esses veículos são considerados a próxima geração para substituição dos convencionais veículos propulsionados por motores a combustão interna.

Os veículos a célula de combustível a hidrogênio possuem algumas vantagens

comparando com os veículos elétricos a bateria, como maior autonomia e menor tempo de abastecimento. O hidrogênio utilizado por essas células de combustível se produzido por fontes renováveis de energia (eólica, solar ou biomassa) é chamado de hidrogênio verde.

Embora os veículos de célula a combustível a hidrogênio durante sua condução não emitam gases poluentes, tanto a cadeia de suprimentos do hidrogênio quanto a cadeia de produção do próprio veículo não estão isentas dessas emissões. Portanto, os benefícios desses veículos precisam ser ponderados sob uma perspectiva de ciclo de vida.

2 JUSTIFICATIVA

O setor de transporte desempenha um papel vital no cenário global, sendo um dos pilares essenciais para o desenvolvimento econômico, social dos países. O setor representa 26% do consumo final de energia no mundo sendo dependente de produtos derivados do petróleo, como a gasolina e o diesel, correspondendo a 91% do consumo energético (*International Energy Agency, 2023a*). Em relação às emissões de dióxido de carbono, o setor de transporte emitiu cerca de 8 gigatoneladas de CO₂ na atmosfera em 2022. Deste total, cerca de 5,9 gigatoneladas são atribuídos especificamente aos transportes rodoviários (*International Energy Agency, 2023b*).

No Brasil, a parcela do setor de transporte no consumo de energia é de 33%. Essa porcentagem, maior em comparação ao mundo é explicada pelo amplo domínio do transporte rodoviário no país (Baran; Legey, 2013). Em 2022, o total de emissões de CO₂ equivalente dos transportes no país foi de 210,4 milhões de toneladas, representando quase metade das emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira (Empresa de Pesquisa Energética, 2023).

A eletrificação dos veículos automotores representa uma transformação significativa no setor de transporte, com implicações diretas nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Essa proposta é crucial no contexto das mudanças climáticas e dos esforços globais para reduzir o impacto ambiental. Nessa conjuntura, os veículos elétricos a bateria e os veículos de célula a combustível, como as tecnologias mais proeminentes do processo de eletrificação, desempenharão uma função vital na transição energética para uma economia de baixo carbono no setor de transporte (Bonsu, 2020). Apesar de o processo de eletrificação estar transcorrendo lentamente no Brasil (Grangeia *et al.*, 2023). Entretanto, alguns esforços do governo têm sido delineados. Em 2022, o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH₂) foi instituído com o objetivo de fomentar a utilização do hidrogênio, principalmente produzido de fontes renováveis de energia, na matriz energética nacional, incluso sua aplicação em veículos a célula de combustível.

Em contrapartida, no tocante aos biocombustíveis, desde a implantação do Programa Nacional do Alcool (PróAlcool), nos anos 1970 (Gonçalves *et al.*, 2021), até a instituição da Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio (Grangeia; Santos; Lazaro., 2022), em 2017, esses biocombustíveis têm adquirido um papel central no país a fim de alcançar os compromissos nacionalmente determinados pelo Brasil no âmbito do acordo de Paris (*United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015*).

O RenovaBio, inclui Análise de Ciclo de Vida (ACV) e instrumentos financeiros, apoiando a segurança energética nacional e reduzindo as emissões de GEE. Ela se concentra em aumentar o consumo de biocombustíveis e expandi-lo na matriz energética brasileira, incentivando os produtores e criando um mercado aberto para créditos de redução de carbono chamados Créditos de Descarbonização (CBIO).

Em 2021, o Governo Federal também lançou o Programa Combustível do Futuro com o objetivo de aumentar o uso de combustíveis de baixa intensidade de carbono e descarbonizar a matriz de transporte. Propõe medidas como a avaliação completa da eficiência energético-ambiental por meio da ACV. Além disso, este programa busca se integrar com outros programas governamentais, como a própria RenovaBio, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE Veicular) e o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet).

Como constatado, a Análise de Ciclo de Vida tem sido amplamente utilizada em programas governamentais, bem como na gestão de negócios mais sustentáveis, auxiliando em tomadas de decisão mais embasadas (Guinée *et al.*, 2011). Em síntese, a ACV é um método que estima o consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas a um produto ao longo de todos os estágios de sua vida. Especificamente, no contexto da ACV para combustíveis automotivos e outras fontes energéticas de propulsão, a análise *Well-to-Wheel* (WTW) tem recebido considerável atenção e pode ser dividida em dois conjuntos de processos: *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Wheel* (TTW). WTT engloba processos como a extração da matéria-prima, produção do combustível, armazenamento, distribuição para postos de abastecimento e o próprio reabastecimento. Já TTW representa a operação do veículo, onde o combustível é consumido para gerar energia que movimenta o veículo (Edwards *et al.*, 2004).

Devido ao crescimento de estudos relacionados à Análise de Ciclo de Vida nos últimos anos e a diversidade de tecnologias de propulsão de veículos automotores, o mapeamento bibliométrico surge como uma ferramenta importante para apresentar uma visão geral quantitativa e descritiva dessa área de conhecimento. Além disso, os métodos de análise bibliométrica minimizam a subjetividade e aumenta a confiabilidade das descobertas (Bernatović; Gomezel; Černe, 2022).

Além disso, existem algumas controvérsias na aplicação dos veículos a célula de combustível particularmente em relação ao real impacto ambiental. Este impacto depende

principalmente dos métodos e tecnologias implementados ao longo da cadeia de suprimentos do hidrogênio. Ademais, o extensivo uso de biocombustíveis por veículos automotores no Brasil é um fator motivador para realização de estudos comparativos de emissões de gases poluentes para diferentes tecnologias de propulsão.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é realizar uma análise bibliométrica dos artigos sobre a Análise de Ciclo de Vida (ACV) aplicada a veículos automotores, publicados nos últimos 20 anos, para identificar tendências de pesquisa, principais áreas de estudo, e a influência de políticas públicas relacionadas ao hidrogênio verde na produção científica.

3.2 Objetivos específicos

- Mapear a produção científica, identificando o número total de artigos publicados disponíveis nas plataformas Scopus e Web of Science sobre ACV aplicada a veículos automotores ao longo dos últimos 20 anos e analisando a distribuição temporal, destacando os anos de maior produção científica;
- Realizar uma análise de palavras-chave para identificar os principais temas abordados nos artigos sobre ACV de veículos automotores;
- Classificar os artigos de acordo com os diferentes tipos de veículos (convencionais, elétricos, híbridos, células de combustível);
- Analisar o número de citações dos artigos sobre ACV de veículos automotores para avaliar o impacto e a relevância das pesquisas;
- Investigar a influência de políticas públicas relacionadas ao hidrogênio verde na produção científica sobre ACV de veículos automotores;
- Analisar a relação entre as políticas públicas de diferentes países e a quantidade de pesquisas publicadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Análise de Ciclo de Vida

A Análise de Ciclo de Vida é um método de avaliação abrangente empregado para estimar as possíveis consequências ambientais e o uso de recursos associados ao ciclo de vida completo de um produto. Este ciclo de vida abrange a obtenção de matérias-primas, as fases de fabricação e processamento, bem como a utilização do produto e, finalmente, seu descarte ou reciclagem. Ao considerar cada fase do ciclo de vida de um produto, a ACV permite uma compreensão mais holística de seu aspecto ambiental, destacando áreas para possíveis melhorias e promovendo a tomada de decisões sustentáveis. Em essência, a ACV serve como um instrumento valioso para empresas, formuladores de políticas e consumidores avaliarem e compararem o desempenho ambiental dos produtos, fomentando o desenvolvimento de alternativas ecológicas e impulsionando a sustentabilidade geral em várias indústrias (Singh; Olsen; Pant, 2013).

O desenvolvimento, aplicação, coordenação internacional, padronização e disseminação da ACV e sua metodologia evoluíram ao longo de décadas (Bjørn *et al.*, 2018). O *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA), precursor da ACV, concentra-se no monitoramento da quantidade de energia e recursos utilizados, bem como na geração de emissões e resíduos sólidos. À medida que os inventários se tornam mais complexos e os cenários de aplicação se expandem, bancos de dados que aderem a padrões consistentes de qualidade, software especializado em ACV e novos padrões internacionais foram desenvolvidos sucessivamente.

Em 1997, a Organização Internacional para Padronização – *International Organization for Standardization* (ISO) – introduziu a norma ISO 14040, intitulada Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura. Subsequentemente, uma série de outras normas foi publicada, culminando na ISO 14044, que estabelece os requisitos e diretrizes para a realização de um estudo de ACV (Hauschild; Rosenbaum; Olsen, 2018). A ACV, conforme definido pelas normas ISO 14040 e 14044, é um processo sistemático que consiste em quatro etapas principais:

1. Definição de Objetivo e Escopo: Esta etapa inicial estabelece o propósito e o escopo da ACV, definindo as fronteiras do sistema e considerando os potenciais impactos indiretos. Ela estabelece a base para a avaliação, determinando a unidade funcional e identificando os processos envolvidos.

2. **Análise de Inventário:** Na fase subsequente, é compilado um registro abrangente de dados dentro do escopo do sistema especificado. Isso abrange informações de entrada, como recursos, energia e maquinário, junto com detalhes de saída, como produtos principais, produtos secundários, contaminantes e resíduos. Além disso, são coletados e anotados dados sobre efeitos indiretos, possivelmente cobrindo consequências ambientais e sociais ou utilização do solo.

3. **Avaliação de Impacto:** Na terceira etapa, os impactos ambientais são categorizados e analisados quantitativamente. Esse processo envolve avaliar as potenciais consequências das entradas e saídas identificadas na análise de inventário, atribuindo-as a categorias de impacto específicas, como mudança climática, esgotamento de recursos ou saúde humana.

4. **Interpretação dos Resultados:** A etapa final envolve interpretar os achados, tirar conclusões e discutir recomendações com base nos resultados da avaliação. Esta etapa fornece insights valiosos sobre o desempenho ambiental do produto ou sistema em estudo e informa os processos de tomada de decisão para melhorias e desenvolvimento sustentável.

Seguindo estas quatro etapas, a ACV oferece uma abordagem abrangente e sistemática para entender e avaliar os impactos ambientais de produtos e processos, permitindo escolhas informadas e a promoção de práticas sustentáveis em diversos setores da economia.

4.1.1 Aplicação de Análise de Ciclo de Vida em Veículos Automotores

A indústria automotiva utiliza amplamente a ACV para avaliar os impactos ambientais de diferentes tipos de veículos, incluindo veículos convencionais de combustão interna, elétricos, híbridos e de células de combustível (Oliveira *et al.*, 2022).

Evidentemente, se for considerado apenas a fase de operação, os veículos de combustão interna geram muito mais emissões de carbono e poluição ambiental em comparação com outros veículos. No entanto, ao incluir todo o processo *Well-to-Wheel*, não fica imediatamente claro qual dos tipos de veículos tem os impactos ambientais mais significativos (Kalghatgi, 2018). Os estudos de ACV aplicado a veículos de combustão interna se concentram na implementação de tecnologias avançadas de combustão que melhoram a eficiência térmica efetiva máxima (Liu *et al.*, 2024). A melhoria adicional na eficiência térmica pode ser alcançada através da tecnologia de recuperação de calor residual (Valencia; Fontalvo; Forero, 2021), por exemplo. Entretanto, a principal área de concentração de estudos desses veículos é a substituição total ou parcial de combustíveis fósseis por

combustíveis de zero ou baixo carbono, como hidrogênio (Candelaresi *et al.*, 2021), amônia (Boero *et al.*, 2023), biodiesel (Perčić; Vladimir; Fan, 2020), bioetanol (Byun *et al.*, 2021), biogás (Shinde *et al.*, 2021), metanol, gasolina e diesel sintéticos (Alonso-Villar *et al.*, 2022), além de outras misturas de combustíveis fósseis e biocombustíveis (Arcentales; Silva; Ramirez, 2023).

A configuração mais comum da tecnologia híbrida atualmente é a combinação de Motores de Combustão Interna (MCI) com motores elétricos. A tecnologia híbrida permite que os MCI operem dentro das condições de alta eficiência na maior parte do tempo de operação, melhorando assim a eficiência geral de conversão de energia e reduzindo as emissões de CO₂ (Xue *et al.*, 2023). Um estudo mostrou que os sistemas de propulsão híbridos usando bioetanol apresentam um potencial significativo para reduzir tanto as emissões de dióxido de carbono quanto de óxidos de nitrogênio em comparação com veículos de motores de combustão interna convencionais (García *et al.*, 2020).

Os Veículos Elétricos a Bateria (VEB) são frequentemente promovidos como uma alternativa mais sustentável aos veículos de MCI. A literatura indica que, embora os VE tenham emissões significativamente menores durante a fase de uso, a produção das baterias de íon-lítio requer uma quantidade significativa de energia e representa um impacto ambiental considerável (Degen; Schütte, 2022). A fonte de eletricidade utilizada para recarga também é um fator crítico; a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis melhora significativamente o perfil ambiental dos VE (Choi; Shin; Woo, 2018).

Os Veículos a Células de Combustível (VCC), que utilizam hidrogênio como fonte de energia, são outra alternativa promissora (Kilic *et al.*, 2023). Estudos mostram que, apesar de terem emissões zero durante a operação, a produção de hidrogênio, especialmente quando derivado de fontes fósseis, pode ter impactos ambientais substanciais. A transição para hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis é essencial para melhorar o perfil ambiental dos VCC (Sarathy *et al.*, 2022).

A maioria dos trabalhos publicados sobre os VCC são estudos comparativos entre diferentes tecnologias de propulsão. A literatura ainda mostra que a escolha da tecnologia mais sustentável depende de fatores contextuais, como a matriz energética de países, como China (Wang *et al.*, 2020a) e Estados Unidos (Wanniarachchi *et al.*, 2023), e categorias de veículos, como veículos leves (Usai *et al.*, 2021) e pesados (Lee *et al.*, 2018).

4.2 Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica é uma ferramenta recente dentro da cientometria que utiliza métodos matemáticos e estatísticos para analisar e avaliar publicações científicas. Isso permite que pesquisadores explorem o status atual e as tendências emergentes na literatura acadêmica de um campo de pesquisa específico (Khan; Ahmad; Majava, 2021).

À medida que o número de estudos em vários campos cresce, o principal benefício da pesquisa bibliométrica é sua capacidade de resumir grandes quantidades de publicações científicas, apresentando assim a estrutura intelectual e as novas tendências de pesquisa do campo examinado (Donthu *et al.*, 2021). A análise bibliométrica oferece uma vantagem sobre métodos alternativos como revisões sistemáticas da literatura ou meta-análises em termos de redução do viés subjetivo nas revisões de literatura (Bernatović; Gomezel; Černe, 2022).

A pesquisa bibliométrica combina análise de desempenho e análise de mapeamento científico. A análise de desempenho avalia indicadores de atividade de publicação (Cobo *et al.*, 2011), destacando contribuições significativas para um campo de pesquisa. As técnicas incluem frequência de publicações, frequência de citações, publicações altamente citadas e contagens por unidade de análise (autores, países, instituições, fontes etc.). O mapeamento científico analisa relações entre constituintes de pesquisa, fornecendo uma visão espacial das conexões entre diferentes unidades científicas (Caputo *et al.*, 2021). As técnicas aqui incluem análise de citações, análise de cocitação, acoplamento bibliográfico, co-ocorrência de palavras-chave, análise de coautoria, análise de detecção de explosão e análise de linha do tempo, todas enriquecidas por métricas de rede, agrupamento e visualização, para retratar a estrutura intelectual do campo (Donthu *et al.*, 2021).

A análise de citações avalia o impacto de uma publicação através da contagem de citações (Donthu *et al.*, 2021; Khan; Ahmad; Majava, 2021). A análise de cocitação identifica publicações ligadas por referências compartilhadas em outra bibliografia de publicação, sugerindo similaridade temática e fornecendo uma representação dinâmica de um tópico (Caputo *et al.*, 2021; Donthu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020b).

Outro método, a análise de acoplamento bibliográfico explora conexões entre artigos que citam um terceiro artigo comum (Caviggioli; Ughetto, 2019), oferecendo uma representação estática do tópico, pois as referências de um artigo não mudam ao longo do tempo (Caputo *et al.*, 2021; Ferreira, 2018). A co-ocorrência de palavras-chave, uma forma de

análise de conteúdo, mede a frequência do emparelhamento de palavras-chave em publicações, iluminando a estrutura conceitual de um campo de pesquisa (Khan; Ahmad; Majava, 2021; Wang *et al.*, 2020b).

Para identificar tendências emergentes e desafios em um campo de pesquisa, é possível aplicar análises de detecção de explosão e de linha do tempo. A análise de detecção de explosão destaca itens que ganham rapidamente atenção, indicando novas tendências de pesquisa (Li; Xu, 2022). A análise de linha do tempo identifica novas tendências de pesquisa ao longo do tempo, facilitada por algoritmos de agrupamento que revelam potenciais clusters transformadores (Wang *et al.*, 2020b).

Recentemente, a análise bibliométrica ganhou popularidade em assuntos relacionados à mitigação de emissões de gases de efeito estufa (Zhang; Liang, 2020). Especificamente na área de Análise de Ciclo de Vida (ACV), alguns pesquisadores aplicaram métodos bibliométricos e obtiveram resultados marcantes (Souza; Barbastefano, 2011).

Em um estudo foi investigado artigos de ACV indexados no banco de dados Web of Science (WoS) e foi analisada a estrutura interna em detalhes (Chen *et al.*, 2014). Em alguns trabalhos foram realizadas análises dos artigos relacionados à Análise de Ciclo de Vida de uma maneira geral (Qian, 2014). Enquanto, outros trabalhos focaram em diferentes áreas de interesse, tais como bioenergia (Li *et al.*, 2018), edificações (Nwodo; Anumba, 2019), tratamento de água de rejeito (Furness *et al.*, 2021) e produção de bioetanol (Santoyo-Castelazo *et al.*, 2023). Este último utilizou o banco de dados Web of Science e Scopus para a análise bibliométrica.

5 METODOLOGIA

5.1 Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica é uma ferramenta importante para avaliar o impacto, a relevância e as tendências da produção científica ao longo dos anos. Além disso, a análise permite a correlação de palavras-chave com o objetivo de avaliar as conexões entre diversos temas científicos. Desse modo, com o intuito de quantificar a importância do tema proposto no campo científico, a análise bibliométrica foi realizada com base em artigos científicos de diversas revistas.

As informações utilizadas nessa análise foram coletadas dos bancos de dados Scopus da empresa Elsevier e Web of Science da empresa Clarivate Analytics. Eles foram selecionados por possuírem dois dos maiores materiais bibliográficos dentre os bancos de dados disponíveis mundialmente (Pranckutė, 2021). Ademais, esses bancos oferecem a capacidade de reunir todos os metadados necessários para a avaliação.

Em relação à estratégia de pesquisa, a identificação e a seleção das palavras-chave associadas ao objeto do estudo foram realizadas através de investigação inicial sobre o tema, verificando os artigos principais relacionados. A pesquisa considerou os artigos publicados nas últimas duas décadas (2003 a 2022). A Tabela 1 mostra as equações de pesquisa utilizadas para os dois bancos de dados.

Tabela 1 – Equações de pesquisa

Banco de Dados	Equação de Pesquisa
Scopus	TITLE-ABS-KEY("life cycle assessment" OR "life cycle analysis") AND TITLE-ABS-KEY("greenhouse gas*") AND TITLE-ABSKEY("fuel cell vehicle*" OR "electric vehicle*" OR "hybrid vehicle*" OR "internal combustion engine vehicle*") AND DOCTYPE(ar) AND LANGUAGE(english)
Web of Science	TS=("life cycle assessment" OR "life cycle analysis") AND TS=("greenhouse gas*") AND TS=("fuel cell vehicle*" OR "electric vehicle*" OR "hybrid vehicle*" OR "internal combustion engine vehicle*") AND DT=(Article) AND LA=(English)

Fonte: elaborado pelo autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise Bibliométrica

Através da seleção dos artigos, foram encontrados 351 trabalhos na base Scopus e 402 trabalhos na base Web of Science. A partir disso, foi utilizado um algoritmo desenvolvido em R para o processamento dos dados coletados, chamado Bibliometrix. Essa ferramenta transforma esses dados de modo a obter os indicadores relacionados à análise bibliométrica (Aria; Cuccurullo, 2017). Além de transformar os dados, o algoritmo constatou e retirou os artigos comuns a ambos os bancos de dados, que somaram 241 artigos. Assim, a compilação dos dados coletados resultou em 512 artigos (Juvêncio; Silva; Freire, 2024).

Tabela 2 – Produção científica nos últimos 10 anos

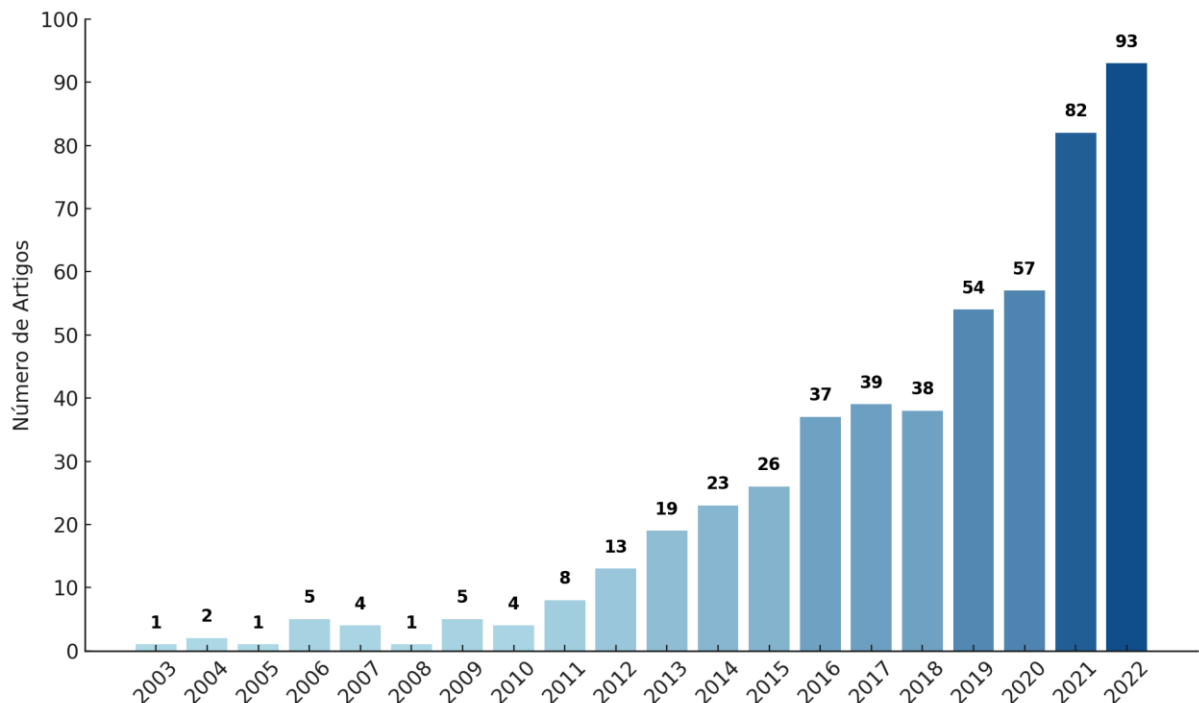
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Nº de Artigos (P)	23	19	37	26	39	38	54	57	82	93
Nº de Citações (TCS)	1975	1616	2489	1375	2066	1866	2393	1481	1540	586
Nº de Autores (AU)	84	71	117	91	137	172	252	253	353	470
Média de Citações (MCS)	85,87	85,05	67,27	52,88	52,97	49,11	44,31	25,98	18,78	6,30
Média de Autores por Artigo (MA)	3,65	3,74	3,16	3,50	3,51	4,53	4,67	4,44	4,30	5,05

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta o Número de Artigos (P), Número de Citações (TCS) e a Média de Citações (MCS), que são usados para avaliar a produção científica dos artigos coletados nos últimos 10 anos. Ao analisar o número de artigos, vê-se que, no ano de 2013, 23 artigos foram publicados, ao passo que 93 trabalhos foram publicados em 2022. Isso significa que, em curto período, houve um crescimento de mais de quatro vezes na produção de artigos relacionados ao tema. Uma segunda maneira de apreciar a preponderância dos assuntos é

através do exame do número de citações que foram feitas a cada ano. É notório que 2015 foi o ano com maior número de citações, com um total de 2.489. Um outro modo de aferir a relevância de um tópico consiste de examinar a quantidade de autores por ano e, nesse caso, constata-se um crescimento exponencial ao longo dos anos, o que confirma a relevância do tema de análise de ciclo de vida de veículos automotores na academia. Ao todo, considerando os últimos vinte anos, 1.415 pessoas foram indicadas como autores nos trabalhos científicos apresentados. Um quarto indicador da significância do objeto de estudo é a média de citações por artigo em cada ano. Na análise bibliométrica, é importante salientar que, em anos recentes, é comum apresentar baixa média de citações por documento, pois o tempo de referência é menor. Além disso, quanto menor o número de artigos maior será o índice. O ano com o maior índice MCS mostrado na tabela foi 2013 com 85,87 e o menor foi 2022 com 6,30. A média de citações por artigo dos trabalhos coletados na pesquisa foi de 41,53. Por fim, o número de autores não varia significativamente durante o período de avaliação, refletindo um valor médio absoluto de 4,11 e uma tendência de crescimento, como pode ser visto nos últimos 5 anos, nos quais registraram valores médios maiores que a média absoluta.

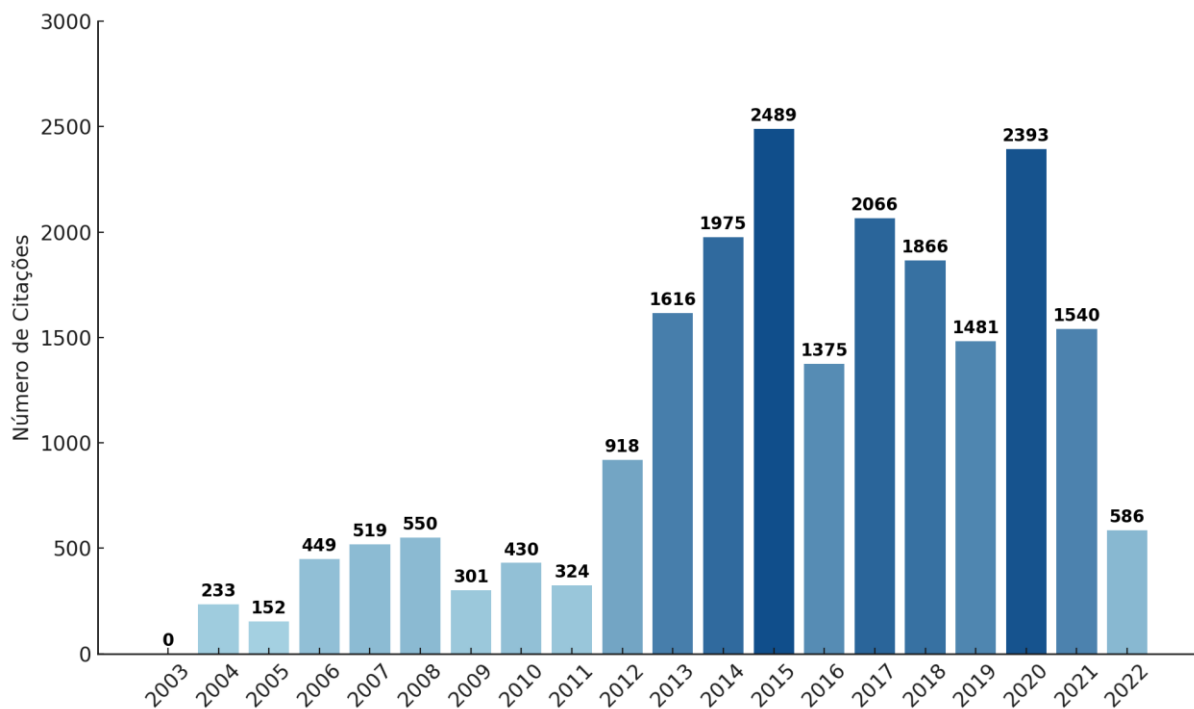
Figura 1 – Palavras-chave por ano



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 1 exibe o crescimento exponencial do número total de artigos publicados relacionados ao tema de estudo de ACV. Nos primeiros dez anos, o aumento é mais lento em comparação com os anos subsequentes. A partir de 2019, o crescimento da curva aumenta e os saltos em cada ano são maiores até que quase dobram entre 2020 e 2021, demonstrando um típico comportamento de uma evolução exponencial. A taxa de crescimento anual foi de 26,94%. Este salto pode ser explicado pela divulgação de programas e estratégias de incentivo para produção e consumo de hidrogênio de baixo ou zero carbono por diversos países. Em 2017, o Japão publicou a primeira estratégia básica de hidrogênio (*Japanese Government, 2017*), que foi posteriormente estendida para o Roteiro Estratégico para Hidrogênio e Células de Combustível com um plano de cooperação entre a indústria, academia e governo para criar uma Sociedade do Hidrogênio em 2019 (*Hydrogen and Fuel Cell Strategy Council of Japan, 2019*). A Coreia do Sul, Austrália e Nova Zelândia também publicaram suas estratégias em 2019, este último com o objetivo de exportar hidrogênio verde (*Ministry of Business, Innovation & Employment, 2019*). Em 2020, o número de estratégias nacionais de hidrogênio publicadas aumentou significativamente com 14 *roadmaps* nacionais, bem como o *roadmap* de hidrogênio da União Européia (*European Commission, 2020*). Até o final de 2022, um total de 32 governos possuía uma estratégia de hidrogênio implementada (*International Energy Agency, 2023b*).

Figura 2 – Evolução do número de citações por ano



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 2 mostra o número de citações feitas em cada ano. De 2013 em diante, o número de citações aumentou consideravelmente. O número de citações nesse ano mais que duplicou em relação ao ano anterior. Embora entre os anos de 2013 e 2022 tenha havido uma flutuação das citações, a média no período permanece acima de 1000 citações por ano. A queda no número de citações em 2022 é coerente, pois trata-se do ano mais recente dos artigos publicados.

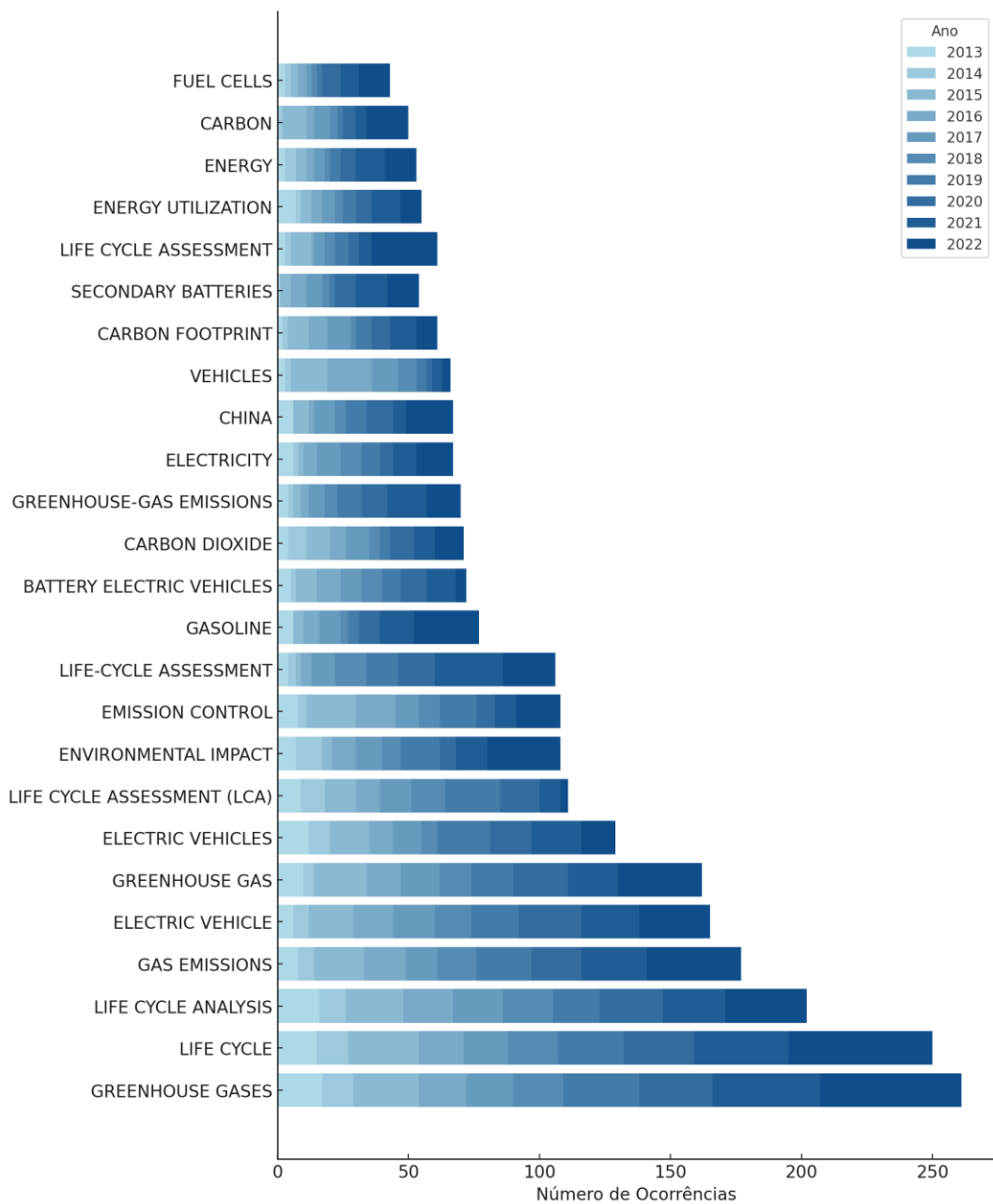
Tabela 3 – Palavras-chave mais relevantes nos últimos 10 anos

Palavra-chave	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
greenhouse gases	17	12	25	18	18	19	29	28	41	54
life cycle	15	12	27	17	17	19	25	27	36	55
life cycle analysis	16	10	22	19	19	19	18	24	24	31
gas emissions	8	6	19	16	12	15	21	19	25	36
electric vehicle	6	6	17	15	16	14	18	24	22	27
greenhouse gas	10	4	20	13	15	12	16	21	19	32
electric vehicles	12	8	15	9	11	6	20	16	19	13
life cycle assessment (lca)	9	9	12	9	12	13	21	15	8	3
environmental impact	7	10	4	9	10	7	15	6	12	28
emission control	8	3	19	15	9	8	14	7	8	17
life-cycle assessment	4	3	2	4	9	12	12	14	26	20
gasoline	6	0	4	6	8	3	4	8	13	25
battery electric vehicles	5	2	8	9	8	8	7	10	11	4
carbon dioxide	4	7	9	6	9	4	4	9	8	11
greenhouse-gas emissions	4	2	3	3	6	5	9	10	15	13
electricity	6	2	2	5	9	8	7	5	9	14
china	6	0	6	2	8	4	8	10	5	18
vehicles	3	2	14	17	10	7	4	2	4	3
carbon footprint	2	2	8	7	9	2	6	7	10	8
secondary batteries	1	0	8	6	6	3	2	8	12	12

Fonte: elaborado pelo autor.

As palavras-chave usadas para coletar os artigos na pesquisa nos bancos de dados são importantes para o estudo bibliométrico, pois a frequência desses termos em trabalhos expressa a pertinência do assunto no ambiente acadêmico. Nesse caso, a Tabela 3 estabelece as vinte mais frequentes palavras-chave ao longo dos últimos dez anos de pesquisa. As palavras-chave *greenhouse gases*, *life cycle* e *life cycle analysis* são predominantes e apresentam um tendência de crescimento, enquanto as demais manifestam uma oscilação do seu emprego no decorrer dos anos. Valer ressaltar também a significativa quantidade de variações de um mesmo termo ou assunto.

Figura 3 – Palavras-chave por ano

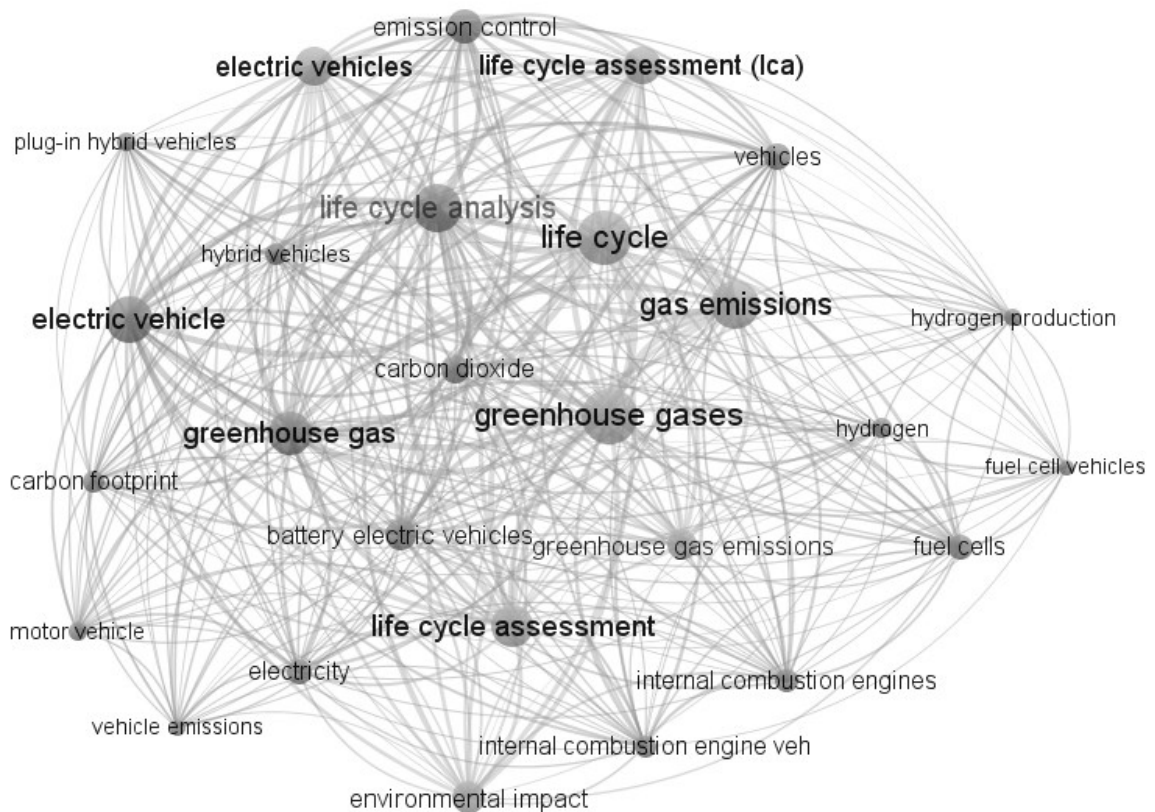


Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 3 apresenta um gráfico com as 25 palavras-chave mais relacionadas ao tema proposto. Observa-se que dentre os tópicos vinculados a tipos de propulsão veicular, como *electric vehicle* ou *gasoline*, os veículos elétricos figuram entre os assuntos mais utilizados. Vale frisar também que a palavra-chave *fuel cells* obteve um crescimento de ocorrências em trabalhos nos 3 últimos, o que comprova a recente atenção dada a este tema.

Na Figura 4, as palavras-chave mais relevantes são novamente exibidas, porém, neste caso, em forma de um diagrama de redes que permite a observação das relações entre as palavras-chave baseada na sua proximidade, quantidade de arestas de ligação e a densidade medida por sua respectiva ocorrência. Esta visualização foi gerada através do software VOSviewer.

Figura 4 – Visualização de redes de palavras-chave



Fonte: elaborado pelo autor.

O diagrama revela que os termos relacionados a veículos elétricos estão diametralmente opostos aos referentes ao hidrogênio, demonstrando a separação entre estudos sobre veículos puramente elétricos e aqueles com células de combustível. Além disso, a baixa densidade de conexões entre palavras-chave referentes ao hidrogênio com as demais palavras-chave confirma a precisão em abordar este tema em futuros trabalhos.

Tabela 4 – Países com maior número de artigos

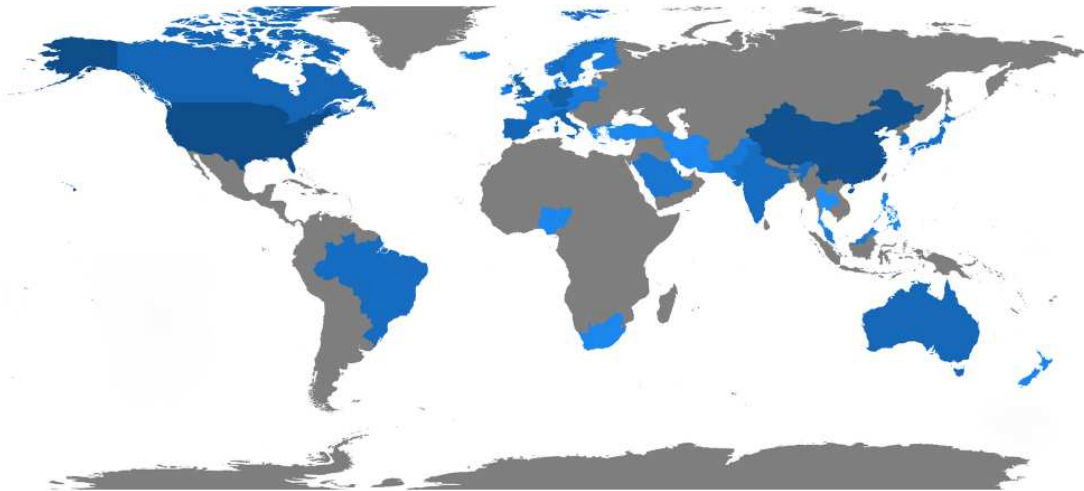
País	Nº de Artigos	SCP	MCP	Nº de Citações
EUA	134	124	10	6998
CHINA	84	72	12	3200
ALEMANHA	30	27	3	540
CANADÁ	27	26	1	1396
ITÁLIA	25	21	4	651
ESPAÑA	19	18	1	428
REINO UNIDO	14	12	2	839
AUSTRÁLIA	13	10	3	386
JAPÃO	12	12	0	287
COREIA DO SUL	12	11	1	341
ÍNDIA	11	9	2	152
PORTUGAL	11	7	4	459
NORUEGA	10	9	1	1589
SUÉCIA	8	6	2	469
SUIÇA	7	6	1	431
BRASIL	6	5	1	214
BÉLGICA	5	5	0	332
IRLANDA	5	3	2	113
TURQUIA	5	4	1	166
ÁUSTRIA	4	4	0	51

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 5 e a Tabela 4 mostra o mapa de produção científica mundial acerca do tema e os vinte países com as maiores produções de artigos relacionados ao tema da pesquisa, respectivamente. O primeiro aspecto a se destacar é presença nas dez primeiras posições de países localizados no hemisfério norte (com exceção da Austrália) e que possuem um competitivo mercado tecnológico. Outro ponto relevante é por esses países também serem os maiores emissores de gases de efeito estufa. Nota-se ainda o predomínio dos Estados Unidos e da China tanto em número de artigos quanto em número de citações. Um aspecto interessante é que, em geral, nos trabalhos acadêmicos que tratem de hidrogênio, os seus objetivos vão ao encontro das finalidades de suprimento de hidrogênio destacados nos

respectivos programas estratégicos de hidrogênio de cada país. Por exemplo, a finalidade do Programa de Hidrogênio do Departamento de Energia dos Estados Unidos é a exportação do hidrogênio. Logo, nota-se que os trabalhos estão em sintonia com as políticas públicas governamentais.

Figura 5 – Mapa de produção científica mundial



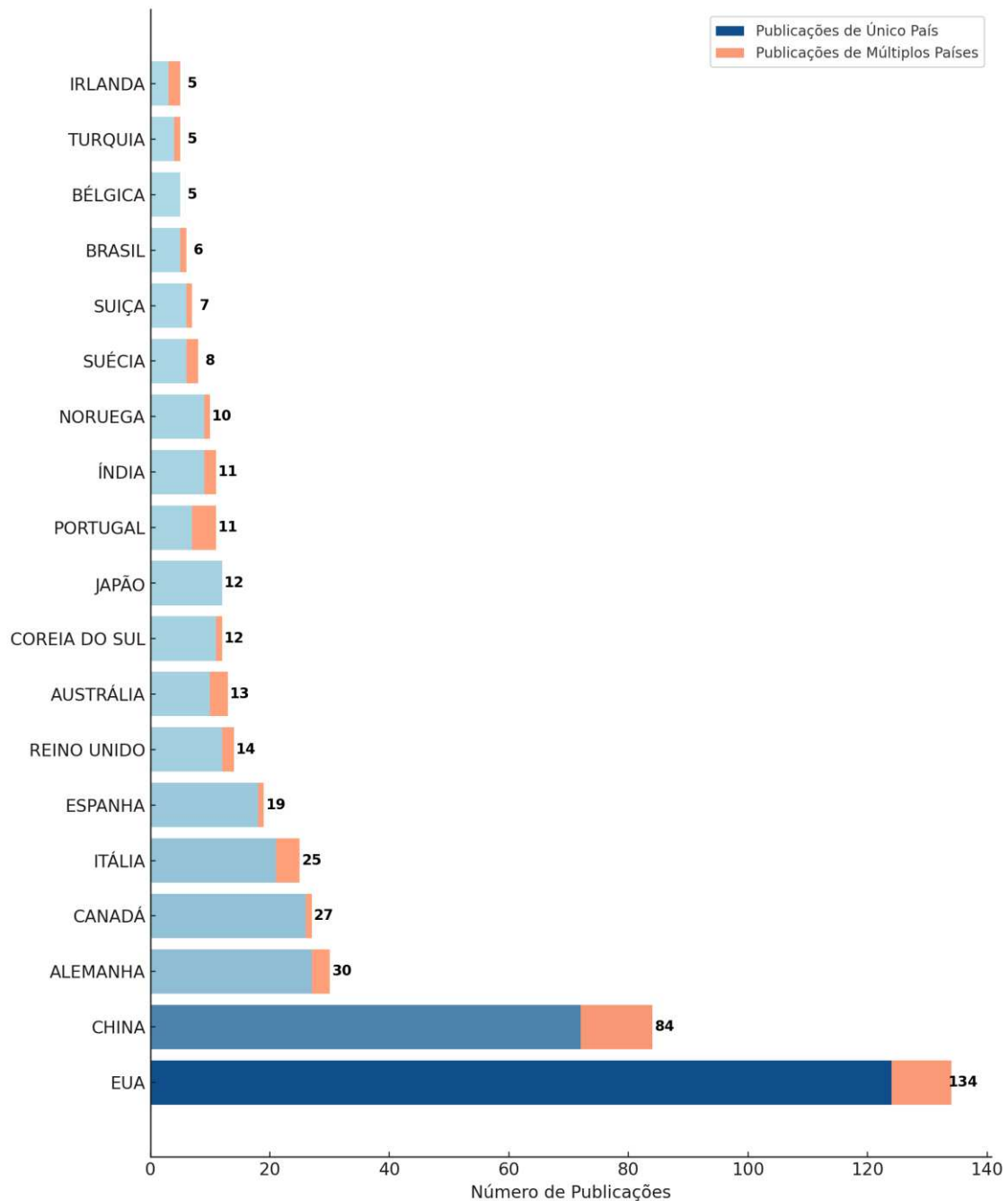
Fonte: elaborado pelo autor.

O baixo número de trabalhos acadêmicos brasileiros sobre Análise de Ciclo de Vida (ACV) em veículos automotores pode ser justificado pela recente implementação e ainda em desenvolvimento do PNH₂, que está mais voltado para estabelecer bases econômicas e industriais do que para a produção intensiva de pesquisa acadêmica. Além disso, a ênfase no desenvolvimento de infraestrutura para produção e distribuição de hidrogênio pode ter direcionado recursos e atenção para áreas mais aplicadas e de curto prazo, em vez de incentivar estudos acadêmicos detalhados e de longo prazo, como os relacionados à ACV.

Adicionalmente, o Brasil enfrenta desafios em termos de financiamento contínuo para Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), que é crucial para produzir trabalhos científicos de alta qualidade e impacto. A falta de um histórico robusto de P&D específico em tecnologias de hidrogênio, comparado a outros países, também contribui para o menor volume de publicações.

A Figura 6 apresenta de forma gráfica a produção de trabalhos acadêmicos realizados nos últimos vinte anos, abordando o tema de pesquisa proposto. Esse gráfico não apenas destaca a hegemonia dos Estados Unidos e da China em relação ao tópico, mas também sublinha o domínio dessas nações na produção científica global. Vale salientar também a escassez de trabalhos realizados pelo Brasil acerca do tema.

Figura 6 – Número de artigos por país

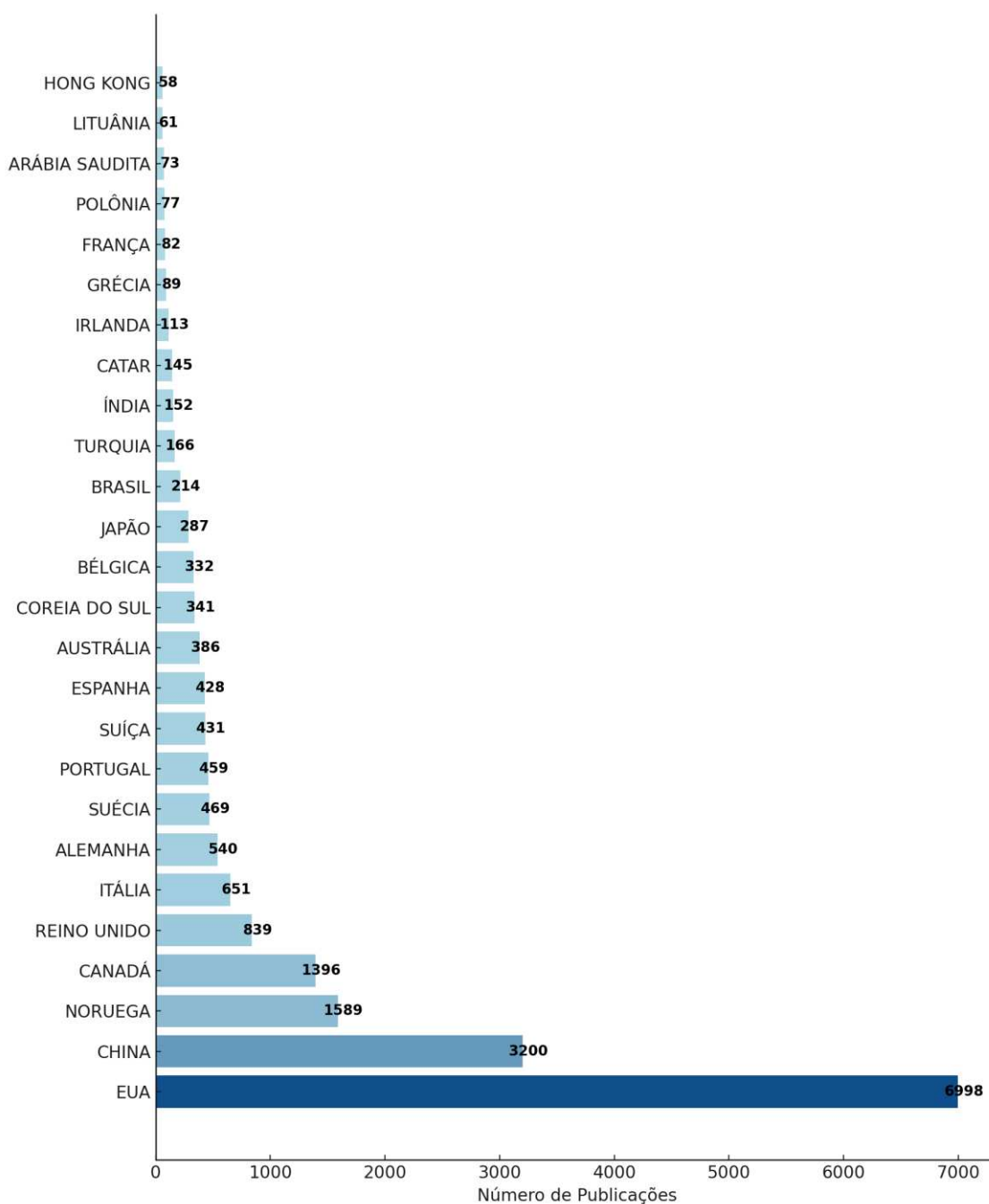


Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 7 exibe o gráfico de número de citações de cada país. Destaca-se que, apesar do baixo número de artigos, o Brasil possui uma aceitável média de citações por artigos (35,7 citações/artigo) levando em consideração as outras posições do ranking. Melhor ainda está a situação da Noruega que, com apenas 10 artigos, possui 1589 citações, acarretando uma média de quase 159 citações por artigo. Isso pode ser atribuído à sua liderança e expertise em tecnologias de hidrogênio, combinada com a excelência em pesquisa

e desenvolvimento que atrai atenção global e reconhecimento na forma de citações acadêmicas (*Norwegian Government, 2020*). Por outro lado, a Alemanha apresentou uma média de apenas 18 citações por artigo no período. A estratégia de hidrogênio da Alemanha, que privilegia a importação de hidrogênio verde (*The Federal Government, 2020*), pode influenciar a natureza e o foco das suas pesquisas científicas, resultando em uma menor média de citações. A falta de ênfase na produção interna de tecnologias de hidrogênio pode limitar o impacto e a visibilidade internacional de suas publicações científicas na área.

Figura 7 – Número de citações por país



Fonte: elaborado pelo autor.

7 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma análise bibliométrica abrangente para avaliar as tendências e o desenvolvimento da pesquisa acadêmica sobre o ciclo de vida de veículos automotores de diferentes tecnologias de propulsão ao longo das últimas décadas. Os resultados destacam um crescimento notável na produção científica nessa área, como evidenciado pelo aumento significativo no número de artigos publicados.

Este crescimento reflete não apenas o interesse crescente, mas também a importância crescente do tema na comunidade científica global. Além disso, o estudo revelou um foco predominante em veículos elétricos, área que tem recebido considerável atenção acadêmica. No entanto, é importante destacar a necessidade de expandir a pesquisa para incluir análises do ciclo de vida relacionadas a veículos a célula de combustível. Essa tecnologia, uma alternativa promissora na eletrificação do setor de transporte, ainda não foi tão explorada quanto os veículos puramente elétricos.

Em suma, esta análise bibliométrica fornece insights valiosos sobre o desenvolvimento e as tendências na pesquisa do ciclo de vida de veículos automotores, destacando a área como um campo dinâmico e em expansão na pesquisa científica. Este estudo não apenas reflete o crescimento do interesse e da importância do tema, mas também serve como um guia para futuras investigações e colaborações no campo.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTURSO

Na sequência do presente trabalho e considerando os resultados apresentados e as lacunas identificadas ao longo do estudo, algumas sugestões para pesquisas futuras podem ser propostas. A seguir, foram referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser objetivo de futura investigação:

- **Análise Comparativa de Tecnologias de Propulsão para o Estado do Ceará e sua Influência na Mobilidade Urbana e Rodoviária:** Investigar e analisar como diferentes tecnologias de propulsão — incluindo veículos elétricos, híbridos, a combustão interna e a célula de combustível — impactam a mobilidade urbana e rodoviária no Ceará. A pesquisa deve considerar fatores regionais, como a matriz energética do estado, as condições climáticas e a infraestrutura disponível, para determinar a eficiência energética, as emissões e a viabilidade econômica de cada tecnologia no contexto cearense. Além disso, o estudo pode avaliar como essas tecnologias influenciam a qualidade do transporte público e privado, bem como seu potencial para melhorar a mobilidade sustentável na região.
- **Impacto das Políticas Públicas sobre a Produção Científica:** Investigar como diferentes políticas públicas influenciam a produção científica e a implementação de novas tecnologias automotivas sustentáveis, utilizando a análise bibliométrica para mapear essas influências.
- **Integração de Biocombustíveis com Tecnologias Híbridas:** Estudar o potencial da integração de biocombustíveis em sistemas híbridos, analisando tanto a viabilidade econômica quanto os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida.
- **Expansão da Pesquisa em Países em Desenvolvimento:** Fomentar estudos sobre ACV em veículos automotores focados em países emergentes, como o Brasil, para entender melhor as particularidades locais e as oportunidades de redução de emissões.
- **Desenvolvimento de Metodologias de ACV para Novas Tecnologias:** Propor novas metodologias de Análise de Ciclo de Vida adaptadas às emergentes tecnologias automotivas, como o uso de baterias de estado sólido ou combustíveis sintéticos, para avaliar seus impactos ambientais de forma mais precisa.

Essas propostas buscarão ampliar o escopo das pesquisas sobre ACV e contribuirão para o desenvolvimento de veículos automotores mais sustentáveis, alinhados com as políticas públicas e as necessidades globais e regionais de redução de emissões de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- ALONSO-VILLAR, A.; DAVÍÐSDÓTTIR, B.; STEFÁNSSON, H.; ÁSGEIRSSON, E. I.; KRISTJÁNSSON, R. Technical, economic, and environmental feasibility of alternative fuel heavy-duty vehicles in iceland. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 369, p. 133249, 2022.
- ARCENALES, D.; SILVA, C.; RAMIREZ, A. D. Environmental analysis of road transport: Sugarcane ethanol gasoline blend flex-fuel vs battery electric vehicles in ecuador. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 118, p. 103718, 2023.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. The introduction of electric vehicles in brazil: Impacts on oil and electricity consumption. **Technological Forecasting and Social Change**, Elsevier, v. 80, n. 5, p. 907–917, 2013.
- BERNATOVIĆ, I.; GOMEZEL, A. S.; ČERNE, M. Mapping the knowledge-hiding field and its future prospects: a bibliometric co-citation, co-word, and coupling analysis. **Knowledge Management Research & Practice**, Taylor & Francis, v. 20, n. 3, p. 394–409, 2022.
- BJØRN, A.; OWSIANIAK, M.; MOLIN, C.; HAUSCHILD, M. Z. **LCA history**. Life cycle assessment: theory and practice, Springer, p. 17–30, 2018.
- BOERO, A.; MERCIER, A.; MOUNAÏM-ROUSSELLE, C.; VALERA-MEDINA, A.; RAMIREZ, A. D. Environmental assessment of road transport fueled by ammonia from a life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 390, p. 136150, 2023.
- BONSU, N. O. Towards a circular and low-carbon economy: Insights from the transitioning to electric vehicles and net zero economy. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 256, p. 120659, 2020.
- BYUN, J.; KWON, O.; PARK, H.; HAN, J. Food waste valorization to green energy vehicles: sustainability assessment. **Energy & Environmental Science**, Royal Society of Chemistry, v. 14, n. 7, p. 3651–3663, 2021.
- CANDELARESI, D.; VALENTE, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J.; SPAZZAFUMO, G. Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 46, n. 72, p. 35961–35973, 2021.
- CAPUTO, A.; PIZZI, S.; PELLEGRINI, M. M.; DABIC, M. Digitalization and business models: ' Where are we going? a science map of the field. **Journal of Business Research**, Elsevier, v. 123, p. 489–501, 2021.
- CAVIGGIOLI, F.; UGHETTO, E. A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 208, p. 254–268, 2019.

CHEN, H.; YANG, Y.; YANG, Y.; JIANG, W.; ZHOU, J. A bibliometric investigation of life cycle assessment research in the web of science databases. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 19, p. 1674–1685, 2014.

CHOI, H.; SHIN, J.; WOO, J. Effect of electricity generation mix on battery electric vehicle adoption and its environmental impact. **Energy Policy**, Elsevier, v. 121, p. 13–24, 2018.

COBO, M. J.; LÓPEZ-HERRERA, A. G.; HERRERA-VIEDMA, E.; HERRERA, F. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the fuzzy sets theory field. **Journal of Informetrics**, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 146–166, 2011.

DEGEN, F.; SCHÜTTE, M. Life cycle assessment of the energy consumption and ghg emissions of state-of-the-art automotive battery cell production. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 330, p. 129798, 2022.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, Elsevier, v. 133, p. 285–296, 2021.

EDWARDS, R.; MAHIEU, V.; GRIESEMAN, J.-C.; LARIVÉ, J.-F.; RICKEARD, D. J. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context. **SAE Transactions**, JSTOR, p. 1072–1084, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe**. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, 2020. Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf. Acesso em: 03 abr. 2024.

FERREIRA, F. A. Mapping the field of arts-based management: Bibliographic coupling and co-citation analyses. **Journal of Business Research**, Elsevier, v. 85, p. 348–357, 2018.

FURNESS, M.; BELLO-MENDOZA, R.; DASSONVALLE, J.; CHAMY-MAGGI, R. Building the ‘bio-factory’: A bibliometric analysis of circular economies and life cycle sustainability assessment in wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 323, p. 129127, 2021.

GARCÍA, A.; MONSALVE-SERRANO, J.; MARTÍNEZ-BOGGIO, S.; ROSO, V. R.; SANTOS, N. D. S. A. Potential of bio-ethanol in different advanced combustion modes for hybrid passenger vehicles. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 150, p. 58–77, 2020.

GONÇALVES, F.; PERNA, R.; LOPES, E.; MACIEL, R.; TOVAR, L.; LOPES, M. Strategies to improve the environmental efficiency and the profitability of sugarcane mills. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, v. 148, p. 106052, 2021.

GRANGEIA, C.; SANTOS, L.; FERREIRA, D. V.; GUIMARÃES, R.; OZORIO, L. de M.; TAVARES, A. Energy transition scenarios in the transportation sector in brazil: Contributions from the electrical mobility. **Energy Policy**, Elsevier, v. 174, p. 113434, 2023.

GRANGEIA, C.; SANTOS, L.; LAZARO, L. L. B. The brazilian biofuel policy (renovabio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. **Energy Conversion and Management**: X, Elsevier, v. 13, p. 100156, 2022.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. **Life cycle assessment: past, present, and future**. [S.l.]: ACS Publications, 2011.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life cycle assessment**. [S.l.]: Springer, 2018. v. 2018.

HYDROGEN AND FUEL CELL STRATEGY COUNCIL OF JAPAN. **The strategic road map for hydrogen and fuel cells: industry-academia-government action plan to realize a “hydrogen society”**. Retrieved March, v. 3, p. 2020, 2019. Disponível em: https://www.hydrogenenergysupplychain.com/wp-content/uploads/2021/07/0312_002b.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen for Net-Zero**. 2021. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2023**. In: IEA PARIS, FRANCE. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking clean energy progress 2023**. In: IEA PARIS, FRANCE. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>. Acesso em: 12 abr. 2024.

JAPANESE GOVERNMENT. **Basic hydrogen strategy**. Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues, 2017. Disponível em: <https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/Basic%20Hydrogen%20Strategy%20%28EN%29.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2024.

JUVÊNCIO, J. de Q.; SILVA, W. N. da; FREIRE, F. N. A. Bibliometric study of life cycle analysis applied to motor vehicles. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. e04502–e04502, 2024.

KALGHATGI, G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? **Applied Energy**, Elsevier, v. 225, p. 965–974, 2018.

KHAN, I. S.; AHMAD, M. O.; MAJAVA, J. Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, circular economy and sustainable business models perspectives. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 297, p. 126655, 2021.

KILIC, A.; ORAL, B.; EROGLU, D.; YILDIRIM, R. Machine learning for beyond li-ion batteries: powering the research. **Journal of Energy Storage**, Elsevier, v. 73, p. 109057, 2023.

LEE, D.-Y.; ELGOWAINY, A.; KOTZ, A.; VIJAYAGOPAL, R.; MARCINKOSKI, J. Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium-and heavy-duty trucks. **Journal of Power Sources**, Elsevier, v. 393, p. 217–229, 2018.

LI, B.; XU, Z. A comprehensive bibliometric analysis of financial innovation. **Economic research-Ekonomska istraživanja**, Taylor and Francis Group i Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Fakultet, v. 35, n. 1, p. 367–390, 2022.

LI, W.; CIAIS, P.; MAKOWSKI, D.; PENG, S. A global yield dataset for major lignocellulosic bioenergy crops based on field measurements. **Scientific Data**, Nature Publishing Group, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2018.

LIU, H.; YU, S.; WANG, T.; LI, J.; WANG, Y. A systematic review on sustainability assessment of internal combustion engines. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, p. 141996, 2024.

MINISTRY OF BUSINESS, INNOVATION & EMPLOYMENT. **Vision for hydrogen in new zealand**. Energy Strategies for New Zealand, 2019. Disponível em: <https://www.mbie.govt.nz/building-and-energy/energy-and-naturalresources/energy-trategies-for-new-zealand>. Acesso em: 12 abr. 2024.

NORWEGIAN GOVERNMENT. **The norwegian government's hydrogen strategy**. The Norwegian Government's Hydrogen Strategy, 2020. Disponível em: <https://www.regjeringen.no/contentassets/8ffd54808d7e42e8bce81340b13b6b7d/hydrogenstrategienengelsk.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2024.

NWODO, M. N.; ANUMBA, C. J. A review of life cycle assessment of buildings using a systematic approach. **Building and Environment**, Elsevier, v. 162, p. 106290, 2019.

OLIVEIRA, F. B. D.; NORDELÖF, A.; SANDÉN, B. A.; WIDERBERG, A.; TILLMAN, A.-M. Exploring automotive supplier data in life cycle assessment—precision versus workload. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 105, p. 103247, 2022.

PERČIĆ, M.; VLADIMIR, N.; FAN, A. Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of croatia. **Applied Energy**, Elsevier, v. 279, p. 115848, 2020.

PRANCKUTÈ, R. Web of Science (WoS) and Scopus: The titans of bibliographic information in today's academic world. **Publications**, v. 9, n. 1, 2021. ISSN 2304-6775. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-6775/9/1/12>. Acesso em: 10 abr. 2024.

QIAN, G. Scientometric sorting by importance for literatures on life cycle assessments and some related methodological discussions. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 19, p. 1462–1467, 2014.

SANTOYO-CASTELAZO, E.; SANTOYO, E.; ZURITA-GARCÍA, L.; LUENGAS, D. C.; SOLANO-OLIVARES, K. Life cycle assessment of bioethanol production from sugarcane bagasse using a gasification conversion process: Bibliometric analysis, systematic literature review and a case study. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 219, p. 119414, 2023.

SARATHY, S. M.; NAGARAJA, S. S.; SINGH, E.; CENKER, E.; AMER, A. Review of life cycle assessments (lca) for mobility powertrains. **Transportation Engineering**, Elsevier, v. 10, p. 100148, 2022.

SHINDE, A. M.; DIKSHIT, A. K.; ODLARE, M.; THORIN, E.; SCHWEDE, S. Life cycle assessment of bio-methane and biogas-based electricity production from organic waste for utilization as a vehicle fuel. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer, v. 23, p. 1715–1725, 2021.

SINGH, A.; OLSEN, S. I.; PANT, D. Importance of life cycle assessment of renewable energy sources. *In*: Life cycle assessment of renewable energy sources. [S.l.]: Springer, 2013. p. 1–11.

SOUZA, C. G. de; BARBASTEFANO, R. G. Knowledge diffusion and collaboration networks on life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 16, p. 561–568, 2011.

THE FEDERAL GOVERNMENT. **The national hydrogen strategy**. [S.l.]: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy Berlin, Germany, 2020. Disponível em: https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6. Acesso em: 04 abr. 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Glasgow Climate Pact**. 2021. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf. Acesso em: 04 abr. 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Paris Climate Pact**. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/media/521376/paris-electro-mobility-declaration.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

USAI, L.; HUNG, C. R.; VÁSQUEZ, F.; WINDSHEIMER, M.; BURHEIM, O. S.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 280, p. 125086, 2021.

VALENCIA, G.; FONTALVO, A.; FORERO, J. D. Optimization of waste heat recovery in internal combustion engine using a dual-loop organic rankine cycle: Thermo-economic and environmental footprint analysis. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 182, p. 116109, 2021.

WANG, Q.; XUE, M.; LIN, B.-L.; LEI, Z.; ZHANG, Z. Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in china. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 275, p. 123061, 2020.

WANNIARACHCHI, S.; HEWAGE, K.; WIRASINGHE, C.; KARUNATHILAKE, H.; SADIQ, R. Hydrogen fuel supply chains for vehicular emissions mitigation: A feasibility assessment for north american freight transport sector. **International Journal of Sustainable Transportation**, Taylor & Francis, v. 17, n. 8, p. 855–869, 2023.

XUE, X.; LI, J.; SUN, X.; ABDUL-MANAN, A. F.; DU, S.; LIU, H.; XU, S.; ZHAO, M. Assessing decarbonization pathways of china's heavy-duty trucks in a well-to-wheels perspective. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Springer, v. 28, n. 7, p. 862–876, 2023.

ZHANG, K.; LIANG, Q.-M. Recent progress of cooperation on climate mitigation: A bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 277, p. 123495, 2020.