

OPERAÇÕES DE BAIXO CARBONO EM INDÚSTRIAS MANUFATUREIRAS: ESTRATÉGIAS CHAVES PARA PRODUTOS, PROCESSOS E CADEIA DE SUPRIMENTOS

Rachel Rany Scabora (Universidade de São Paulo)

Thayla Tavares de Sousa Zomer (Universidade de São Paulo)

Raynara Pizini Alves (Universidade Federal do Mato Grosso do Sul)

Eduardo de Senzi Zancul (Universidade de São Paulo)



A crescente urgência em mitigar os impactos das mudanças climáticas têm elevado as operações de baixo carbono ao status de prioridade estratégica nas indústrias manufatureiras. Este estudo busca identificar e classificar as principais estratégias adotadas por organizações industriais com o objetivo de reduzir as emissões de carbono ao longo das dimensões de produto, processo e cadeia de suprimentos. A partir de uma revisão sistemática da literatura, que abrange 50 artigos científicos revisados por pares, foram mapeadas abordagens tecnológicas, organizacionais e sistêmicas voltadas à descarbonização industrial. Os achados revelam uma convergência em torno de temas como ecodesign, eficiência energética na manufatura, cadeias de suprimentos em ciclo fechado, colaboração interorganizacional e adoção de tecnologias habilitadoras, como modelos de otimização e soluções digitais. Ao oferecer uma visão integrada dessas estratégias, o estudo contribui com a literatura ao evidenciar caminhos concretos para operações industriais mais sustentáveis. Além disso, são apontadas direções promissoras para pesquisas futuras, incluindo o uso de métodos mistos, o desenvolvimento de frameworks analíticos e a aplicação de técnicas de análise por clusters.

Palavras-chave: Descarbonização; Estratégias; Produtos; Processos; Cadeia de suprimentos.

1. Introdução

A mudança climática consolidou-se como uma das maiores ameaças à humanidade no século XXI, sendo impulsionada, em grande parte, pelo aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) (MOSHOOO *et al.*, 2021). Diante desse cenário, a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas enfatiza a necessidade de integrar princípios de sustentabilidade às estratégias corporativas, como a descarbonização das atividades industriais, a promoção de práticas de manufatura sustentável e a adoção de modelos produtivos de baixo carbono (JOSH; SHARMA, 2024). Tais ações se mostram fundamentais frente aos impactos já observados das mudanças climáticas, os quais desafiam o desenvolvimento sustentável e comprometem a qualidade de vida das futuras gerações (YANG *et al.*, 2024).

A redução das emissões de carbono deixou de ser apenas uma meta ambiental e passou a representar uma urgência compartilhada em escala global. A gestão de emissões de gases de efeito estufa (GEE) ocupa um papel central na governança climática e é reconhecida como um compromisso comum entre governos, empresas e organizações internacionais (YANG *et al.*, 2024). Ressalta-se, ainda, que o setor de manufatura responde por aproximadamente 40% das emissões globais de carbono (HE *et al.*, 2016), o que reforça a necessidade de transformações profundas nesse segmento. Portanto, repensar as operações industriais à luz de estratégias de baixo carbono torna-se essencial para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos (WANKE, 2021).

A literatura tem avançado significativamente ao explorar estratégias específicas para a redução de emissões de carbono em diferentes dimensões das operações manufatureiras, oferecendo contribuições importantes para a construção de soluções mais sustentáveis no setor industrial (DODA *et al.*, 2016). No entanto, ainda é possível perceber uma lacuna importante: a falta de uma visão mais integrada que reúna essas diferentes estratégias de forma articulada e coesa (WANKE, 2021). Apesar das contribuições relevantes, a ausência de uma abordagem unificada dificulta a construção de uma compreensão mais ampla e sistêmica sobre como promover, de fato, a descarbonização no contexto industrial.

Diante desse cenário, a questão central do estudo é: “Quais as principais estratégias que podem ser utilizadas pelas indústrias manufatureiras para redução das emissões de carbono nas operações?” Nesse sentido, o principal objetivo da pesquisa é identificar e apresentar essas estratégias, evidenciando a relevância delas no contexto da redução das emissões de CO₂. A intenção é compreender não apenas quais práticas estão sendo implementadas, mas também por que elas são consideradas eficazes e essenciais para promover operações mais sustentáveis no setor industrial.

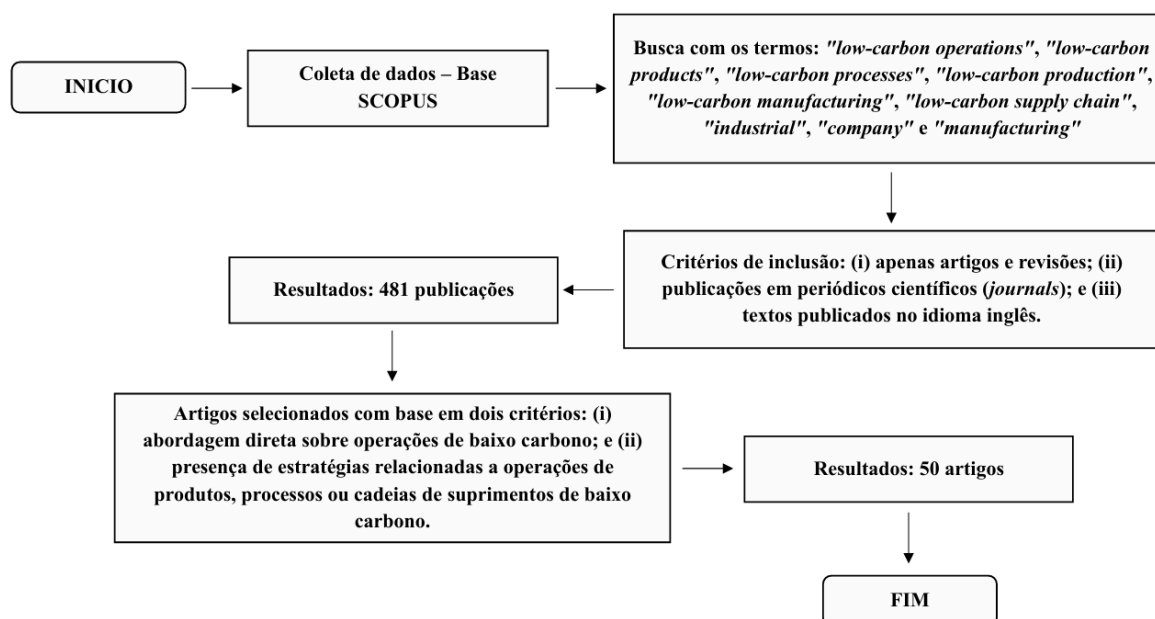
2. Metodologia

Este estudo surgiu da intenção de compreender, de forma ampla e estruturada, quais estratégias de baixo carbono as indústrias manufatureiras têm incorporado em suas operações. Para isso, foi escolhido realizar uma revisão sistemática da literatura com enfoque qualitativo. A combinação desses métodos permite não apenas mapear a produção científica existente sobre o tema, mas também interpretar criticamente os achados, fornecendo uma base sólida para futuras investigações (GRANT; BOOTH, 2009).

A coleta dos dados foi realizada na base Scopus, reconhecida por sua abrangência e rigor na indexação de publicações científicas. A estratégia de busca envolveu a combinação de termos como *"low-carbon operations"*, *"low-carbon products"*, *"low-carbon processes"*, *"low-carbon production"*, *"low-carbon manufacturing"*, *"low-carbon supply chain"*, *"industrial"*, *"company"* e *"manufacturing"*, aplicados ao título, resumo e palavras-chave dos artigos.

Foram definidos os seguintes critérios de inclusão: (i) apenas artigos e revisões; (ii) publicações em periódicos científicos (*journals*); e (iii) textos publicados no idioma inglês. Após a aplicação desses filtros, obteve-se um total de 481 publicações. Esses artigos foram lidos, analisados e selecionados com base em dois critérios principais: (i) abordagem direta sobre operações de baixo carbono; e (ii) presença de estratégias relacionadas a operações de produtos, processos ou cadeias de suprimentos de baixo carbono. Ao final do processo, 50 artigos atenderam plenamente aos critérios estabelecidos e compuseram o corpus final da análise (Figura 1).

Figura 1 - Fluxograma de trajeto de busca



Fonte: Autor (2025).

3. Resultados

Com base na revisão sistemática realizada, foi possível identificar um conjunto abrangente de estratégias adotadas por indústrias manufatureiras para viabilizar operações de baixo carbono. Os resultados obtidos foram organizados de forma a evidenciar as principais abordagens voltadas à descarbonização em três dimensões fundamentais: produto, processo e cadeia de suprimentos. A seguir, são apresentados e discutidos os achados centrais do estudo, com foco nas convergências temáticas, justificativas dos autores e implicações práticas para a descarbonização industrial.

3.1. Estratégias de produtos

As estratégias para produtos de baixo carbono refletem um avanço essencial rumo à descarbonização industrial. Estudos apontam que decisões tomadas nas fases iniciais do ciclo de vida do produto, especialmente no design, são determinantes para reduzir emissões (ZHENG *et al.*, 2021; DU *et al.*, 2015).

Entre as estratégias destacam-se a escolha de materiais sustentáveis, simplificação estrutural, ajustes de espessura e substituições de matérias-primas (SONG *et al.*, 2010; YANG *et al.*, 2020). A otimização estrutural, com foco em topologia e *layout*, reduz recursos sem

comprometer a função (LI; HONG; LIU, 2017). Métodos de otimização multiobjetivo equilibram custo, desempenho e emissões (ZHENG *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2016).

Outras abordagens incluem a remanufatura e o reaproveitamento de componentes (YANG *et al.*, 2020; QI WANG *et al.*, 2019), bem como o design modular de famílias de produtos, que amplia a diversidade com menor impacto ambiental (QI WANG *et al.*, 2016, 2019). Fatores humanos, como o uso eficiente de energia na fase de uso, também são considerados, com apoio de ferramentas como TRIZ e EMS (AI *et al.*, 2020; HE *et al.*, 2015). Técnicas de *lightweight* e otimização topológica reduzem peso e emissões na produção e transporte (HE *et al.*, 2015; LI; HONG; LIU, 2017).

Assim, o design sustentável integrado ao ciclo de vida do produto é um vetor estratégico para a transição rumo à indústria de baixo carbono. A Tabela 1 sistematiza as estratégias para produtos.

Tabela 1: Estratégias de produtos

Autor	Estratégias
Zheng et al. (2021); Du et al. (2015)	Design como ponto de partida para reduzir emissões
Song et al. (2010); Yang et al. (2020)	Escolha de materiais sustentáveis; simplificação estrutural
Li, Hong e Liu (2017)	Otimização estrutural e topológica
Zheng et al. (2021); Wang et al. (2016)	Otimização multiobjetivo (custo, desempenho e emissões)
Yang et al. (2020); Qi Wang et al. (2019)	Remanufatura e reaproveitamento de componentes
Qi Wang et al. (2016, 2019)	Design modular de famílias de produtos
Ai et al. (2020); He et al. (2015)	Análise do uso e interação do usuário; TRIZ e EMS
He et al. (2015); Li, Hong e Liu (2017)	Técnicas de <i>lightweight</i>

Fonte: Autor (2025).

3.2 Estratégias de processos

Diante da urgência climática, diversos autores propõem soluções para reduzir a pegada de carbono na manufatura. Zu, Deng e Chen (2021) destacam que a descarbonização depende do comprometimento gerencial, com investimentos em tecnologia, capacitação e contratos sustentáveis. Li *et al.* (2015) e Deng (2016) propõem medir emissões por fase da usinagem, enquanto Li *et al.* (2012) e Wang *et al.* (2015) aplicam ecoeficiência e análise *input-output* para mapear impactos. Ding *et al.* (2014) sugerem a metodologia ERWV, que integra energia, recursos, resíduos e emissões em uma estrutura unificada.

A eficiência também depende da condução dos processos. Yi *et al.* (2015a, 2015b) mostram ganhos com ajustes em parâmetros e rotas, enquanto Tian *et al.* (2019) inclui o desgaste das ferramentas como variável-chave. Yin *et al.* (2014) defendem substituir etapas poluentes por alternativas mais limpas, e Zhou *et al.* (2020) propõem uma abordagem integrada para cortar o consumo energético.

A eficiência de carbono envolve ainda a escolha de ferramentas (ZHOU *et al.*, 2017), cadeias produtivas (ZHU *et al.*, 2017) e integração energética (GAO *et al.*, 2017) compondo um cenário em que as decisões técnicas se tornam, também, decisões ambientais.. Jia *et al.* (2016) e Cao *et al.* (2017) exploram tecnologias como corte a seco e fresamento de engrenagens para reduzir impactos, sugerindo caminhos práticos para a reinvenção dos processos tradicionais. Meyers *et al.* (2018) sugerem fontes renováveis como substitutas viáveis aos fósseis, e Zhang e Ji (2019) apontam o Big Data como aliado na gestão ambiental. Hu e Zhang (2015) propõem fornos elétricos e reaproveitamento de resíduos gasosos na siderurgia, enquanto Meng *et al.* (2023) mostram o potencial de rebolos microestruturados na redução de emissões. Outras abordagens incluem o uso do hidrogênio (BHASKAR *et al.*, 2021), melhorias em fundição (ZHENG *et al.*, 2018) e otimização do agendamento produtivo (TONG *et al.*, 2016). Wang *et al.* (2023) defendem parâmetros energéticos ideais, máquinas eficientes e simulações como caminhos para uma manufatura limpa e inteligente.

De maneira geral, a descarbonização industrial é um compromisso ético, que exige mais do que tecnologias limpas: requer visão sistêmica, inovação e responsabilidade com as futuras gerações. A Tabela 2 sistematiza as estratégias para processos.

Tabela 2: Estratégias de processos

Autor	Estratégias
Zu, Deng e Chen (2021)	Envolve decisões estratégicas, capacitação, contratos e investimento em tecnologia.
Li <i>et al.</i> (2015), Li <i>et al.</i> (2012), Wang <i>et al.</i> (2015), Deng (2016)	Modelagem e mensuração detalhada do impacto por fase/processo.
Li <i>et al.</i> (2012), Wang <i>et al.</i> (2015)	Avaliação ambiental baseada em desempenho e relações entre entradas e saídas.
Ding <i>et al.</i> (2014)	Metodologia ERWC.
Yi <i>et al.</i> (2015a), Yi <i>et al.</i> (2015b), Tian <i>et al.</i> (2019)	Ajustes técnicos no chão de fábrica para economia de energia e tempo.
Yin <i>et al.</i> (2014), Zhou <i>et al.</i> (2020)	Escolha e sequência de processos menos poluentes (ex: substituição por forjamento).

Zhou <i>et al.</i> (2017), Meng <i>et al.</i> (2023)	Uso de ferramentas que reduzem consumo energético.
Zhu <i>et al.</i> (2017), Gao <i>et al.</i> (2016)	Configuração e integração energética da cadeia produtiva.
Jia <i>et al.</i> (2016), Cao <i>et al.</i> (2017)	Aplicação de técnicas com menor impacto ambiental direto.
Meyers <i>et al.</i> (2018)	Substituição de fontes energéticas fósseis.
Zhang e Ji (2019), Wang <i>et al.</i> (2023)	Uso de Big Data e monitoramento em tempo real.
Hu e Zhang (2015)	Economia circular e reaproveitamento de resíduos.
Bhaskar, Assadi e Somehsaraei (2021), Zheng, Huang e Zhou (2018), Tong <i>et al.</i> (2016), Meng <i>et al.</i> (2023)	Uso de hidrogênio e processos mais limpos (fundição, retificação, agendamento produtivo).
Wang <i>et al.</i> (2023)	Definição de parâmetros energéticos ideais na manufatura
Wang <i>et al.</i> (2023)	Uso de máquinas mais eficientes

Fonte: Autor (2025).

3.3 Estratégias de cadeias de suprimentos

A descarbonização das cadeias de suprimentos é um imperativo global devido às mudanças climáticas causadas pelas emissões excessivas de gases de efeito estufa. Diversos estudos oferecem estratégias para mitigar emissões, com destaque para Golari *et al.* (2017), Zhang *et al.* (2021), Shaw *et al.* (2013) e He e Zhang (2018). Esses estudos abordam principalmente intervenções tecnológicas e produtivas, como a incorporação de fontes renováveis ao modelo produção-estoque, a adoção de tecnologias limpas, e o investimento em P&D.

A estruturação das cadeias logísticas também é central. Shaw *et al.* (2013) defendem a reconfiguração das redes para minimizar o carbono, adotando modos de transporte mais eficientes e redesenhando as cadeias considerando a pegada de carbono dos insumos. He e Zhang (2018) sugerem a seleção de fornecedores com menor impacto ambiental nas etapas iniciais da cadeia. A colaboração entre os elos da cadeia também é importante. Nakajima *et al.* (2015) mostram que a cooperação entre os agentes pode revelar oportunidades de mitigação invisíveis quando analisadas de forma isolada, com destaque para o compartilhamento de dados e o modelo de inventário gerenciado pelo fornecedor (VMI) proposto por Astanti *et al.* (2022).

Políticas públicas e mecanismos de mercado são considerados catalisadores da transição. Zhang *et al.* (2021) defendem políticas de taxação de carbono e o uso de sistemas de "cap-and-trade". Já Li *et al.* (2022) destacam o papel do governo no financiamento da

transição por meio de subsídios e incentivos fiscais. A eficiência operacional também é relevante, com sugestões para otimizar entregas, reduzir perdas de materiais e adotar práticas de logística de baixo carbono, como propõem Astanti *et al.* (2022) e Stefanelli *et al.* (2021). As estratégias propostas abrangem soluções tecnológicas, operacionais, colaborativas, regulatórias e estratégicas, indicando que a mitigação efetiva de emissões demanda ações integradas e sistemicamente coordenadas ao longo de toda a cadeia produtiva. A Tabela 3 sistematiza as estratégias para cadeia de suprimentos identificadas na literatura.

Tabela 3: Estratégias de cadeia de suprimentos

Autor	Estratégias
Golari <i>et al.</i> (2017); Zhang <i>et al.</i> (2021); Li <i>et al.</i> (2022)	Adoção de tecnologias limpas, fontes renováveis (solar/eólica), captura e armazenamento de carbono e investimento em P&D verde.
He e Zhang (2018); Shaw <i>et al.</i> (2013); Nakajima <i>et al.</i> (2015); Stefanelli <i>et al.</i> (2021)	Avaliação e seleção de fornecedores com menor impacto ambiental, controle de perdas materiais e reestruturação da cadeia produtiva com foco em sustentabilidade.
Nakajima <i>et al.</i> (2015); Astanti <i>et al.</i> (2022); Li <i>et al.</i> (2022)	Parcerias estratégicas, contratos colaborativos, gestão compartilhada de estoques (VMI), uso de blockchain e investimentos coordenados entre os elos da cadeia.
Zhang <i>et al.</i> (2021); Astanti <i>et al.</i> (2022); Li <i>et al.</i> (2022)	Análise de instrumentos como cap-and-trade, taxaço de carbono, subsídios verdes e incentivos fiscais para estimular a descarbonização industrial.
Astanti <i>et al.</i> (2022); Nakajima <i>et al.</i> (2015); Stefanelli <i>et al.</i> (2021)	Práticas para redução de desperdícios, otimização da logística de transporte e melhoria da eficiência energética na produção e distribuição.
Stefanelli <i>et al.</i> (2021); Shaw <i>et al.</i> (2013); He e Zhang (2018).	Estratégias de design sustentável, reaproveitamento de materiais, análise do ciclo de vida (ACV) e estímulo à demanda por produtos de baixo carbono.

Fonte: Autor (2025).

4. Discussão

Os resultados obtidos a partir da revisão sistemática da literatura indicam uma conexão entre as estratégias sugeridas para descarbonização industrial e os pilares da sustentabilidade operacional. As ações identificadas, reforçam a tendência crescente de integrar descarbonização como um valor estratégico e não apenas como uma exigência regulatória.

Os resultados desta pesquisa destacam que práticas isoladas, embora relevantes, são insuficientes para promover transformações duradouras. O que se observa é que estratégias unificadas, guiadas por uma visão sistêmica da produção, resultam em maior eficácia na redução de emissões.

Além disso, ao identificar lacunas na abordagem fragmentada da literatura que, muitas vezes, trata produtos, processos e cadeias de forma separada, este trabalho propõe uma visão holística, auxiliando na formação de um quadro mais unificado sobre o assunto. A partir disso, é possível ampliar a compreensão sobre os efeitos combinados das práticas sustentáveis adotadas, sobretudo quando analisadas em conjunto com os demais elos da corrente.

A literatura também destaca desafios importantes, como a dificuldade de mensuração de impactos ambientais, os altos custos iniciais de implementação de tecnologias verdes e a resistência cultural à mudança, especialmente em setores industriais tradicionais (WANKE, 2021). Nesse sentido, os resultados aqui apresentados proporcionam ferramentas valiosas para superar tais barreiras, ao sistematizar práticas concretas que já vêm sendo aplicadas por empresas ao redor do mundo.

Este trabalho contribui significativamente para o avanço da literatura sobre operações de baixo carbono ao propor uma categorização estruturada e integrada das principais estratégias de descarbonização industrial. Ao organizar as práticas em três eixos (produtos, processos e cadeias de suprimentos) o estudo oferece uma ferramenta analítica clara e aplicável tanto para fins acadêmicos quanto gerenciais.

5. Conclusão

O presente estudo teve como objetivo identificar, organizar e refletir sobre estratégias-chave que promovem operações de baixo carbono no setor industrial manufatureiro, com foco em produtos, processos e cadeias de suprimentos. A partir da análise de 50 artigos da base Scopus, foi possível observar que, embora haja um aumento significativo de publicações voltadas à descarbonização industrial nos últimos anos, o campo ainda carece de abordagens integradas que conectem as três dimensões abordadas de forma sistêmica.

A pesquisa contribui de forma significativa para a literatura ao propor uma estrutura integrativa entre estratégias aplicadas ao nível de produto, processos e cadeia de suprimentos. Essa organização contribui para superar uma das principais lacunas encontradas na literatura: a ausência de uma visão holística e categorizada sobre as diferentes frentes de atuação para a descarbonização industrial. Com isso, o artigo não apenas sistematiza o conhecimento existente, mas também oferece uma base conceitual prática e estratégica para gestores e pesquisadores.

Como perspectivas futuras, sugere-se a aplicação de métodos qualitativos e quantitativos para aprofundar a análise das estratégias identificadas. Por exemplo, a utilização do método DEMATEL pode permitir a compreensão das interrelações causais entre os fatores de

descarbonização industrial, evidenciando quais estratégias exercem maior influência sobre outras e quais são mais dependentes, facilitando a priorização de ações. Outra ideia seria realizar o desenvolvimento de um framework integrador que sistematize as estratégias de descarbonização em níveis tático, operacional e estratégico, promovendo sua aplicabilidade em diferentes contextos industriais. Além disso, uma análise de cluster poderia ser aplicada para segmentar setores industriais com características semelhantes, possibilitando o delineamento de estratégias específicas de baixo carbono para cada grupo.

Por fim, espera-se que este artigo inspire novas pesquisas que avancem na modelagem e aplicação prática de operações de baixo carbono em contextos reais, contribuindo para a construção de cadeias produtivas mais resilientes e ambientalmente responsáveis.

REFERÊNCIAS

AI, Xianfeng *et al.* *Low-carbon product conceptual design from the perspectives of technical system and human use.* **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118819, 2020.

ASTANTI, Ririn Diar; DARYANTO, Yosef; DEWA, Parama Kartika. *Low-carbon supply chain model under a vendor-managed inventory partnership and carbon cap-and-trade policy.* **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 8, n. 1, p. 30, 2022.

BHASKAR, Abhinav; ASSADI, Mohsen; SOMEHSARAEI, Homam Nikpey. *Can methane pyrolysis based hydrogen production lead to the decarbonisation of iron and steel industry?.* **Energy Conversion and Management: X**, v. 10, p. 100079, 2021.

CAO, W. D. *et al.* *A novel multi-objective optimization approach of machining parameters with small sample problem in gear hobbing.* **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 93, p. 4099-4110, 2017.

DENG, Zhaohui *et al.* *Study on the model of high efficiency and low carbon for grinding parameters optimization and its application.* **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1672-1681, 2016.

DING, Hui *et al.* *An investigation on quantitative analysis of energy consumption and carbon footprint in the grinding process.* **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 228, n. 6, p. 950-956, 2014.

DODA, Baran *et al.* *Are corporate carbon management practices reducing corporate carbon emissions?.* **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 23, n. 5, p. 257-270, 2016.

DU, Yanbin *et al.* *Life cycle oriented low-carbon operation models of machinery manufacturing industry.* **Journal of Cleaner Production**, v. 91, p. 145-157, 2015.

GAO, Mengdi *et al.* *Carbon emission analysis and reduction for stamping process chain.* **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, p. 667-678, 2017.

GOLARI, Mehdi; FAN, Neng; JIN, Tongdan. *Multistage stochastic optimization for production-inventory planning with intermittent renewable energy.* **Production and Operations Management**, v. 26, n. 3, p. 409-425, 2017.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. *A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies.* **Health Information and Libraries Journal**, v. 26, n. 2, p. 91-108, 2009.

HE, Bin *et al.* *Low-carbon conceptual design based on product life cycle assessment.* **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, p. 863-874, 2015.

HE, Bin *et al.* *Towards low-carbon product architecture using structural optimization for lightweight.* **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, p. 1419-1429, 2016.

HE, Xiangshuo; ZHANG, Jian. *Supplier selection study under the respective of low-carbon supply chain: A hybrid evaluation model based on FA-DEA-AHP.* **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 564, 2018.

HU, Rui; ZHANG, Qun. *Study of a low-carbon production strategy in the metallurgical industry in China*. **Energy**, v. 90, p. 1456-1467, 2015.

JIA, Shun *et al.* *Energy modeling for variable material removal rate machining process: an end face turning case*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 85, p. 2805-2818, 2016.

JOSHI, Sudhanshu; SHARMA, Manu. *Intelligent algorithms and methodologies for low-carbon smart manufacturing: Review on past research, recent developments and future research directions*. **IET Collaborative Intelligent Manufacturing**, v. 6, n. 1, p. e12094, 2024.

LI, Baotong; HONG, Jun; LIU, Zhifeng. *A novel topology optimization method of welded box-beam structures motivated by low-carbon manufacturing concerns*. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2792-2803, 2017.

LI, Congbo *et al.* *A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems*. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 26, p. 911-922, 2015.

LI, Hongcheng; CAO, Huajun; PAN, Xiaoyong. *A carbon emission analysis model for electronics manufacturing process based on value-stream mapping and sensitivity analysis*. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 12, p. 1102-1110, 2012.

LI, Nan *et al.* *Government participation in supply chain low-carbon technology R&D and green marketing strategy optimization*. **Sustainability**, v. 14, n. 14, p. 8342, 2022.

MENG, Qingyu *et al.* *Dynamic force modeling and mechanics analysis of precision grinding with microstructured wheels*. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 314, p. 117900, 2023.

MEYERS, Steven; SCHMITT, Bastian; VAJEN, Klaus. *The future of low carbon industrial process heat: A comparison between solar thermal and heat pumps*. **Solar Energy**, v. 173, p. 893-904, 2018.

MOSHOOD, Taofeeq Durojaye *et al.* *Green and low carbon matters: A systematic review of the past, today, and future on sustainability supply chain management practices among manufacturing industry.* **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, p. 100144, 2021.

NAKAJIMA, Michiyasu; KIMURA, Asako; WAGNER, Bernd. *Introduction of material flow cost accounting (MFCA) to the supply chain: a questionnaire study on the challenges of constructing a low-carbon supply chain to promote resource efficiency.* **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1302-1309, 2015.

SHAW, Krishnendu *et al.* *Modeling a low-carbon garment supply chain.* **Production Planning & Control**, v. 24, n. 8-9, p. 851-865, 2013.

SONG, Jong-Sung; LEE, Kun-Mo. *Development of a low-carbon product design system based on embedded GHG emissions.* **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 9, p. 547-556, 2010.

STEFANELLI, Nelson Oliveira *et al.* *Unleashing proactive low-carbon strategies through behavioral factors in biodiversity-intensive sustainable supply chains: Mixed methodology.* **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 5, p. 2535-2555, 2021.

TIAN, Changle *et al.* *Optimization of cutting parameters considering tool wear conditions in low-carbon manufacturing environment.* **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 706-719, 2019.

TONG, Yifei *et al.* *Research on energy-saving production scheduling based on a clustering algorithm for a forging enterprise.* **Sustainability**, v. 8, n. 2, p. 136, 2016.

WANG, Liping *et al.* *Accuracy design optimization of a CNC grinding machine towards low-carbon manufacturing.* **Journal of Cleaner Production**, v. 406, p. 137100, 2023.

WANG, Qi *et al.* *An optimization approach for the coordinated low-carbon design of product family and remanufactured products.* **Sustainability**, v. 11, n. 2, p. 460, 2019.

WANG, Qi *et al.* *Bi-objective optimization for low-carbon product family design*. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 41, p. 53-65, 2016.

WANG, Yanhong *et al.* *Development of an evaluating method for carbon emissions of manufacturing process plans*. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2015, n. 1, p. 784751, 2015.

WANKE, Peter Fernandes *et al.* *An original information entropy-based quantitative evaluation model for low-carbon operations in an emerging market*. **International Journal of Production Economics**, v. 234, p. 108061, 2021.

YANG, Chunhua *et al.* *Low-carbon operation technologies and challenges for process industry*. **Fundamental Research**, 2024.

YANG, Dong *et al.* *Module-based product configuration decisions considering both economical and carbon emission-related environmental factors*. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1145, 2020.

YI, Qian *et al.* *Multi-objective parameter optimization of CNC machining for low carbon manufacturing*. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 256-264, 2015a.

YI, Qian *et al.* *An optimization model of machining process route for low carbon manufacturing*. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 80, p. 1181-1196, 2015b.

YIN, Ruixue *et al.* *A process planning method for reduced carbon emissions*. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 27, n. 12, p. 1175-1186, 2014.

ZHANG, Chaoyang; JI, Weixi. *Big data analysis approach for real-time carbon efficiency evaluation of discrete manufacturing workshops*. **IEEE Access**, v. 7, p. 107730-107743, 2019.

ZHANG, Guitao *et al.* *Carbon reduction decisions under progressive carbon tax regulations: A new dual-channel supply chain network equilibrium model*. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 1077-1092, 2021.

ZHENG, Hao *et al.* *Knowledge-based integrated product design framework towards sustainable low-carbon manufacturing*. **Advanced Engineering Informatics**, v. 48, p. 101258, 2021.

ZHENG, Jun; HUANG, Binbin; ZHOU, Xingjian. *A low carbon process design method of sand casting based on process design parameters*. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 1408-1422, 2018.

ZHOU, Guanghui *et al.* *Integrated optimization of cutting parameters and tool path for cavity milling considering carbon emissions*. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119454, 2020.

ZHOU, Guanghui *et al.* *Ontology-based cutting tool configuration considering carbon emissions*. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 18, p. 1641-1657, 2017.

ZHU, Shuo *et al.* *A carbon efficiency evaluation method for manufacturing process chain decision-making*. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 665-680, 2017.

ZU, Yafei; DENG, Deqiang; CHEN, Lianghua. *Optimal control of carbon emission reduction strategies in supply chain with wholesale price and consignment contract*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 61707-61722, 2021.