

INTERFACE ENTRE EDUCAÇÃO, MACHINE LEARNING E ENGENHARIA MECÂNICA: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA LITERATURA

Willian Alber da Silva Farias¹;

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/0754692042581100>

Jeniffer Bomfim da Silva²;

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/9631128365143457>

Cleber Medeiros de Lucena³;

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/3638207334942992>

Mikael De Souza Dias⁴;

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/5672323925141938>

Cleiton Rubens Formiga Barbosa⁵;

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/8673332414572221>

Cleiton Rubens Formiga Barbosa Júnior⁶;

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/9160680023711066>

Thiago da Silva André⁷;

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/4001624102117533>

Edilson Marinho da Silva Junior⁸.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal, RN.

<https://lattes.cnpq.br/5756262238802260>

RESUMO: A rápida evolução das tecnologias digitais tem impulsionado transformações significativas na engenharia e nos processos educacionais, especialmente com a crescente incorporação de técnicas de inteligência artificial. Nesse contexto, o machine learning tem se destacado como uma ferramenta relevante tanto para aplicações técnicas em engenharia mecânica quanto para a atualização de práticas pedagógicas na formação de engenheiros. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a literatura científica relacionada à interface entre machine learning, educação e engenharia mecânica por meio de uma abordagem bibliométrica. A coleta de dados foi realizada na base científica ScienceDirect utilizando a expressão de busca que relaciona as áreas analisadas do estudo. Foram considerados artigos publicados entre 2020 e 2026, sendo selecionados os primeiros 1000 resultados para análise. Inicialmente foram identificadas 3546 palavras-chave, das

quais 84 atenderam ao critério mínimo de ocorrência estabelecido para a construção da rede de coocorrência. A análise foi realizada com o software VOSviewer, permitindo identificar as principais relações temáticas presentes na literatura. Os resultados evidenciaram que o machine learning atua como núcleo metodológico dominante, articulando-se a conceitos como inteligência artificial, otimização, simulação e análise de sistemas mecânicos. No campo educacional, destacam-se relações com engenharia 4.0, inovação curricular e uso de tecnologias digitais no ensino de engenharia.

PALAVRAS-CHAVE: Educação em engenharia. Machine learning. Análise bibliométrica.

INTERFACE BETWEEN EDUCATION, MACHINE LEARNING AND MECHANICAL ENGINEERING: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS OF THE SCIENTIFIC LITERATURE

ABSTRACT: The rapid evolution of digital technologies has driven significant transformations in engineering and educational processes, particularly with the increasing incorporation of artificial intelligence techniques. In this context, machine learning has emerged as an important tool both for technical applications in mechanical engineering and for the modernization of pedagogical practices in engineering education. In light of this scenario, the present study aimed to analyze the scientific literature related to the interface between machine learning, education, and mechanical engineering through a bibliometric approach. Data collection was carried out in the ScienceDirect scientific database using a search expression that relates the areas analyzed in this study. Articles published between 2020 and 2026 were considered, and the first 1000 results were selected for analysis. Initially, 3546 keywords were identified, of which 84 met the minimum occurrence criterion established for the construction of the co-occurrence network. The analysis was conducted using the VOSviewer software, allowing the identification of the main thematic relationships present in the literature. The results revealed that machine learning acts as a dominant methodological core, connecting with concepts such as artificial intelligence, optimization, simulation, and mechanical systems analysis. In the educational field, relationships with Industry 4.0, curriculum innovation, and the use of digital technologies in engineering education stand out.

KEYWORDS: Engineering education. Machine learning. Bibliometric analysis.

INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias digitais tem promovido mudanças profundas nos processos produtivos, científicos e educacionais, especialmente em áreas tradicionalmente associadas à inovação tecnológica, como a engenharia. Nesse contexto, o machine learning (aprendizado de máquina) tem se consolidado como uma das principais vertentes da inteligência artificial, permitindo que sistemas computacionais aprendam padrões a partir de dados e realizem previsões, classificações e otimizações sem programação explícita para cada tarefa (GOODFELLOW et al, 2016). Essa capacidade tem impulsionado aplicações em diversos campos da engenharia, incluindo análise de dados industriais, manutenção preditiva,

modelagem de sistemas físicos e otimização de processos produtivos. Como consequência, o machine learning passou a desempenhar papel crescente no desenvolvimento tecnológico e na formação de profissionais de engenharia (JORDAN; MITCHELL, 2015).

No campo da engenharia mecânica, o uso de técnicas de inteligência artificial tem sido ampliado em áreas como análise de propriedades mecânicas de materiais, simulação computacional, diagnóstico de falhas, monitoramento de sistemas industriais e otimização de desempenho energético. Estudos recentes demonstram que algoritmos como redes neurais artificiais, máquinas de vetores de suporte e métodos baseados em ensemble têm sido amplamente aplicados na modelagem e previsão de fenômenos complexos associados a sistemas mecânicos e processos industriais (BRUNTON; KUTZ, 2022). Esse cenário reflete a crescente integração entre engenharia tradicional e tecnologias digitais avançadas, especialmente no contexto da chamada Indústria 4.0, caracterizada pela digitalização da manufatura, pela integração de sistemas ciberfísicos e pelo uso intensivo de dados e inteligência artificial nos processos produtivos (LU, 2017).

Diante dessa transformação tecnológica, a educação em engenharia enfrenta novos desafios relacionados à atualização curricular e à formação de profissionais capazes de atuar em ambientes industriais cada vez mais digitalizados e orientados por dados. A incorporação de conceitos de inteligência artificial, ciência de dados e machine learning nos cursos de engenharia tem sido apontada como elemento fundamental para preparar estudantes para os desafios da manufatura inteligente e da engenharia digital (SNEIDER, 2016). Nesse sentido, a literatura recente tem destacado a necessidade de adaptar metodologias de ensino e conteúdos curriculares para incluir competências relacionadas à programação, análise de dados, modelagem computacional e uso de ferramentas inteligentes aplicadas à engenharia.

Além da inserção de novos conteúdos técnicos, o uso de tecnologias digitais também tem possibilitado novas estratégias pedagógicas no ensino de engenharia. Ferramentas baseadas em inteligência artificial, ambientes de simulação, realidade virtual e análise de dados educacionais têm sido utilizadas para apoiar processos de ensino e aprendizagem mais interativos, experimentais e centrados no estudante (ZAWACKI-RICHTER et al., 2019). Mais recentemente, o avanço de sistemas de inteligência artificial generativa, como modelos de linguagem de grande escala, tem ampliado ainda mais as possibilidades de apoio à aprendizagem, produção de conteúdo educacional e interação entre estudantes e sistemas computacionais (KASNECI et al., 2023).

Nesse contexto, observa-se um crescimento significativo da produção científica que aborda a interseção entre machine learning, engenharia mecânica e educação, refletindo o interesse crescente da comunidade acadêmica em compreender como essas tecnologias podem contribuir para a formação de engenheiros preparados para os desafios da transformação digital. Entretanto, apesar do aumento do número de estudos sobre o tema, ainda há necessidade de compreender de forma sistemática como essa literatura tem se estruturado, quais são os principais temas investigados e quais tendências emergentes

podem ser identificadas.

OBJETIVO

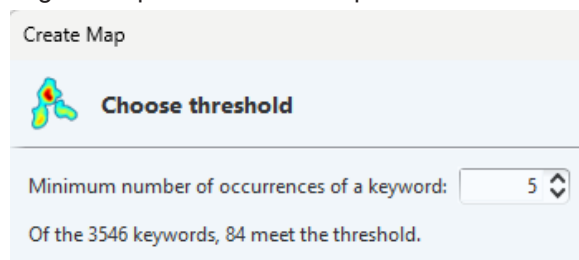
Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar a literatura científica relacionada à interface entre machine learning, educação e engenharia mecânica, por meio de uma abordagem bibliométrica baseada na análise de coocorrência de palavras-chave. A partir da identificação de padrões de associação entre termos presentes em artigos científicos publicados recentemente, busca-se compreender a estrutura temática do campo, bem como identificar os principais eixos de pesquisa que têm orientado o desenvolvimento dessa área emergente na literatura científica.

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliométrica de abordagem quantitativa, destinada a identificar padrões de produção científica e relações temáticas na literatura acadêmica relacionada à interface entre machine learning, educação e engenharia mecânica. A bibliometria consiste em um conjunto de métodos estatísticos aplicados à análise de publicações científicas, permitindo examinar tendências de pesquisa, relações entre conceitos e a evolução de determinados campos do conhecimento a partir de indicadores extraídos de bases de dados científicas (PRITCHARD, 1969; DONTU et al., 2021).

A coleta de dados foi realizada na base científica ScienceDirect, uma das principais plataformas internacionais de literatura acadêmica revisada por pares, amplamente utilizada em estudos bibliométricos nas áreas de engenharia e tecnologia. A estratégia de busca foi definida com o objetivo de recuperar estudos que abordassem simultaneamente aspectos relacionados ao ensino, ao aprendizado de máquina e à engenharia mecânica. Para isso, foi utilizada a seguinte expressão de busca: (“*Teaching*” OR “*Education*”) AND (“*Machine Learning*”) AND (“*Mechanical Engineering*”). A busca foi aplicada considerando publicações no período de 2020 a 2026, com o objetivo de analisar a produção científica recente relacionada ao tema. Após a execução da consulta, foram selecionados os 1000 primeiros artigos retornados pela base de dados, procedimento frequentemente adotado em estudos bibliométricos quando o volume de resultados é elevado e se busca uma amostra representativa da literatura disponível (ZUPIC; ČATER, 2015).

Figura 1: Exigências para inclusão das palavras-chave no VOSviewer.



Fonte: Autores, 2026.

A partir dos artigos selecionados, foram coletados os dados bibliométricos referentes às palavras-chave, os quais constituem importantes indicadores para a identificação de tendências temáticas e relações conceituais dentro de um campo de pesquisa. No conjunto inicial de documentos analisados foram identificadas 3546 palavras-chave distintas. Com o objetivo de reduzir ruídos e concentrar a análise nos termos mais representativos, foi estabelecido um limiar mínimo de ocorrência de 84 repetições por palavra-chave, de acordo com a Figura 1. Esse procedimento permite restringir a rede de análise aos termos com maior relevância dentro do conjunto de publicações, favorecendo a identificação de padrões estruturais na literatura científica (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

A análise de coocorrência das palavras-chave foi realizada utilizando o software VOSviewer, ferramenta amplamente empregada em estudos bibliométricos para construção e visualização de redes científicas. O programa permite identificar relações entre termos a partir da frequência com que aparecem conjuntamente em diferentes documentos, gerando mapas de rede nos quais os nós representam palavras-chave e as conexões indicam relações de coocorrência entre os termos (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

Nos mapas gerados, o tamanho dos nós está associado à frequência de ocorrência das palavras-chave na base de dados analisada, enquanto a proximidade entre os termos indica maior intensidade de associação entre eles. Além disso, o software utiliza algoritmos de agrupamento para identificar clusters temáticos, representados por cores distintas, que correspondem a grupos de termos fortemente relacionados entre si dentro da literatura científica. A partir dessa abordagem, foram elaborados mapas de coocorrência de palavras-chave, incluindo o mapa geral da rede e mapas centrados em termos específicos relevantes para o estudo. Esses mapas foram utilizados para analisar a estrutura temática da literatura, identificar os principais eixos de pesquisa e compreender como os conceitos relacionados a machine learning, educação e engenharia mecânica se articulam na produção científica recente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção científica recente situada na interface entre *machine learning*, educação e engenharia mecânica reflete um cenário de transformação tecnológica acelerada, no qual a formação em engenharia passa a dialogar de modo mais intenso com inteligência artificial, digitalização industrial e novas competências para a Indústria 4.0. Nesse contexto, a análise de coocorrência de palavras-chave permite identificar não apenas os conceitos mais frequentes, mas também a forma como eles se conectam, revelando a estrutura temática do campo. A literatura recente indica que a incorporação de IA e aprendizado de máquina à engenharia vem ocorrendo simultaneamente no plano das aplicações técnicas e no plano da renovação curricular, com ênfase em competências digitais, ambientes inteligentes de manufatura e novas estratégias de ensino em engenharia (CIOLACU et al., 2023; DE SOUZA et al., 2024).

A Figura 2 apresenta o mapa geral de coocorrência e evidencia um núcleo fortemente

desempenho. A associação entre esses termos e o núcleo de *machine learning* reforça que a literatura recuperada é fortemente orientada por aplicações de engenharia, especialmente em contextos de eficiência, previsão e análise de materiais e processos (DE SOUZA et al., 2024; JORDAN, 2015).

Outro resultado relevante é a presença de um cluster associado a sustentabilidade, energia, energia renovável, “*sustainable manufacturing*” e “*3d printing*”. Essa configuração sugere que a integração entre IA e engenharia mecânica também vem sendo impulsionada por agendas contemporâneas ligadas à transição energética e à manufatura sustentável. Em vez de se restringir à automação industrial clássica, o campo passa a incorporar desafios relacionados à eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade, o que amplia o espectro temático da formação em engenharia e da pesquisa aplicada (ZAWACKI-RICHTER, 2019).

Embora em posição mais periférica, termos como “*virtual reality*”, “*augmented reality*” e “*chatgpt*” indicam uma agenda emergente de inovação educacional. A presença desses termos sugere que, além da incorporação curricular de conteúdos de IA, a literatura também começa a discutir o uso de tecnologias imersivas e ferramentas generativas como suporte ao ensino e à aprendizagem de engenharia. Esse movimento é coerente com revisões recentes sobre realidade virtual na educação em engenharia e com estudos que apontam o impacto crescente do ChatGPT e da IA generativa em contextos de formação superior (OJE et al., 2023; GARG et al., 2025; DE MOURA OLIVEIRA et al., 2025).

Outro agrupamento importante articula “*education*”, “*engineering education*”, “*industry 4.0*”, “*industry 5.0*”, “*sensors*”, “*internet of things*” e “*predictive maintenance*”. Esse cluster é particularmente expressivo do ponto de vista educacional, pois indica que a formação em engenharia mecânica vem sendo discutida em estreita relação com a transformação digital da indústria. A proximidade entre *education* e *industry 4.0*, de acordo com a Figura 4, sugere que o ensino aparece, na literatura, como espaço de adaptação curricular às novas exigências tecnológicas, especialmente no que se refere à integração de automação, dados, sensores, gêmeos digitais e sistemas inteligentes aos processos formativos. Esse resultado converge com estudos que defendem a atualização da educação em engenharia para responder às demandas da manufatura inteligente e da Educação 4.0 (CIOLACU et al., 2023; DE SOUZA et al., 2024).

engenharia mecânica, especialmente em áreas como simulação, otimização de sistemas, análise de propriedades mecânicas, eficiência energética e manutenção preditiva.

No campo educacional, os mapas de coocorrência evidenciaram que a educação em engenharia aparece associada principalmente às transformações tecnológicas vinculadas à Indústria 4.0, à digitalização industrial e à incorporação de novas competências relacionadas à inteligência artificial e à análise de dados. Além disso, a presença de termos como realidade virtual, realidade aumentada e ChatGPT indica o surgimento de novas abordagens pedagógicas apoiadas por tecnologias digitais avançadas. Por fim, os resultados demonstram que a literatura científica recente aponta para uma crescente integração entre formação acadêmica, inovação tecnológica e aplicações de machine learning na engenharia mecânica. Esse cenário reforça a necessidade de atualização curricular e de desenvolvimento de estratégias educacionais capazes de preparar engenheiros para atuar em ambientes industriais cada vez mais digitalizados e orientados por dados.

REFERÊNCIAS

- BRUNTON, Steven L.; KUTZ, J. Nathan. **Data-driven science and engineering: Machine learning, dynamical systems, and control**. Cambridge University Press, 2022.
- CIOLACU, Monica Ioniță et al. Fostering engineering education 4.0 paradigm facing the pandemic and VUCA world. **Procedia Computer Science**, v. 217, p. 177-186, 2023.
- DE SOUZA, Alex Sander Clemente; DEBS, Luciana. Concepts, innovative technologies, learning approaches and trend topics in education 4.0: A scoping literature review. **Social Sciences & Humanities Open**, v. 9, p. 100902, 2024.
- DE MOURA OLIVEIRA, P. B.; VRANČIĆ, Damir. The AI Elephant in the Room: ChatGPT in Control Engineering Education. **IFAC-PapersOnLine**, v. 59, n. 7, p. 236-241, 2025.
- DONTHU, Naveen et al. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of business research**, v. 133, p. 285-296, 2021.
- GARG, Ashish; SOODHANI, K. Nisumba; RAJENDRAN, Ramkumar. Enhancing data analysis and programming skills through structured prompt training: The impact of generative AI in engineering education. **Computers and Education: Artificial Intelligence**, v. 8, p. 100380, 2025.
- GOODFELLOW, Ian et al. **Deep learning**. Cambridge: MIT press, 2016.
- JORDAN, Michael I.; MITCHELL, Tom M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. **Science**, v. 349, n. 6245, p. 255-260, 2015.
- KASNECI, Enkelejda et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. **Learning and individual differences**, v. 103, p. 102274, 2023.
- OJE, Adurangba V.; HUNSU, Nathaniel J.; MAY, Dominik. Virtual reality assisted engineering education: A multimedia learning perspective. **Computers & Education: X Reality**, v. 3, p. 100033, 2023.
- PRITCHARD, Alan. Statistical bibliography or bibliometrics. **Journal of documentation**, v.

25, p. 348, 1969.

SNEIDER, Cary. Grand challenges for engineering education. In: **Connecting science and engineering education practices in meaningful ways: Building bridges**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 19-35.

VAN ECK, Nees; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

LU, Yang. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of industrial information integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.

ZAWACKI-RICHTER, Olaf et al. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education—where are the educators?. **International journal of educational technology in higher education**, v. 16, n. 1, p. 39, 2019.

ZUPIC, Ivan; ČATER, Tomaž. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational research methods**, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015.