



REVISÃO BIBLIOMÉTRICA DO IMPACTO DA MANUFATURA ADITIVA NA MODERNIZAÇÃO INDUSTRIAL: UM ESTUDO COM A APLICAÇÃO DA TEORIA DO ENFOQUE META-ANALÍTICO CONSOLIDADO

Bibliometric review of the impact of additive manufacturing on industrial modernization: a study applying the Consolidated Meta-Analytic Focus Theory

Revisión bibliométrica del impacto de la fabricación aditiva en la modernización industrial: un estudio que aplica la Teoría del Enfoque Meta Analítico Consolidado

Alice Teixeira Lacerda Lage¹, Isabella Carvalho dos Santos², Mariana Bravim Duarte³,
Luiz Felipe Piccoli Cavalini⁴, & Thiara Cezana Gomes^{5*}

^{1 2 3 5} Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Engenharia de Produção

⁴ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Engenharia de Computação e Informação

¹ alice.lage@edu.ufes.br ² isabella.c.santos@edu.ufes.br ³ mariana.b.duarte@edu.ufes.br ⁴ felipecavalini@outlook.com

^{5*} thiara.gomes@ufes.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 13.11.2025

Aprovado: 30.01.2026

Disponibilizado: 09.03.2026

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva; Indústria 4.0; Impressão 3D; Sustentabilidade; Modernização Industrial.

KEYWORDS: Additive Manufacturing; Industry 4.0; 3D printing; Sustainability; Industrial Modernization.

PALABRAS CLAVE: Fabricación Aditiva; Industria 4.0; Impresión 3D; Sostenibilidad; Modernización industrial.

*Autor Correspondente: Gomes, T. C.

RESUMO

Este estudo analisa o impacto da Manufatura Aditiva (Additive Manufacturing - AM) na modernização industrial e sua integração à Indústria 4.0. A metodologia consistiu em uma revisão bibliométrica fundamentada na Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC), com dados coletados nas bases Scopus e Web of Science. A análise permitiu a identificação de termos semânticos relevantes e o mapeamento de redes de coautoria e citação, culminando em um portfólio selecionado de oito artigos para análise temática profunda. Os resultados revelam que a tecnologia extrapola a fase de prototipagem, consolidando a sustentabilidade como benefício central, aliada à redução de custos logísticos e à customização em massa. Contudo, o alto custo de insumos e a ausência de padronização técnica permanecem como gargalos significativos. As tendências indicam o desenvolvimento de novas matérias-primas e a expansão da AM em setores estratégicos como o aeroespacial, automotivo e de saúde.

ABSTRACT

This study analyzes the impact of Additive Manufacturing (AM) on industrial modernization and its integration into Industry 4.0. The methodology consisted of a bibliometric review based on the Consolidated Meta-Analytic Focus Theory (TEMAC), with data collected from the Scopus and Web of Science databases. The analysis identified relevant semantic terms and mapped co-authorship and citation networks, resulting in a selected portfolio of eight articles for in-depth thematic analysis. The results reveal that the technology goes beyond the prototyping phase, establishing sustainability as a central benefit, alongside reduced logistical costs and mass customization. However, high material costs and the absence of technical standardization remain significant bottlenecks. Trends indicate the development of new raw materials and the expansion of AM in strategic sectors such as aerospace, automotive, and healthcare.

RESUMEN

Este estudio analiza el impacto de la Fabricación Aditiva (Additive Manufacturing - AM) en la modernización industrial y su integración en la Industria 4.0. La metodología consistió en una revisión bibliométrica fundamentada en la Teoría del Enfoque Metaanalítico Consolidado (TEMAC), con datos recolectados en las bases Scopus y Web of Science. El análisis permitió identificar términos semánticos relevantes y mapear redes de coautoría y citación, culminando en un portafolio seleccionado de ocho artículos para un análisis temático profundo. Los resultados revelan que la tecnología extrapola la fase de prototipado, consolidando la sostenibilidad como beneficio central, aliada a la reducción de costos logísticos y la personalización masiva. No obstante, el alto costo de los insumos y la falta de estandarización técnica permanecen como obstáculos significativos. Las tendencias indican el desarrollo de nuevas materias primas y la expansión de la AM en sectores estratégicos como el aeroespacial, automotriz y de salud.

INTRODUÇÃO

Atualmente, os mercados empresariais enfrentam desafios crescentes, como a necessidade de respostas rápidas às variações da demanda, a otimização da cadeia de suprimentos e a redução do consumo energético. Para atender a esses requisitos, a Indústria 4.0 (I4.0) promove a integração de tecnologias avançadas de manufatura e sistemas de informação, permitindo maior eficiência e flexibilidade nos processos produtivos (Mehrpuoya et al., 2019).

Nesse cenário, a Manufatura Aditiva (AM), também conhecida como impressão 3D, se destaca como uma solução inovadora, trazendo benefícios como a redução de custos, a sustentabilidade e a minimização de resíduos. Além disso, sua capacidade de ampliar as possibilidades de design e facilitar a seleção de materiais impulsiona a incorporação de inovações, tornando-se um elemento essencial na modernização da produção industrial (Chakraborty & Biswas, 2020).

Assim, para compreender o impacto da AM na modernização industrial, é essencial identificar os principais fatores que influenciam sua adoção e desenvolvimento. Diante disso, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática sobre o tema, utilizando a Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC) de Mariano e Rocha (2017), para analisar as contribuições da AM na I4.0, destacando seus benefícios, desafios e tendências futuras.

REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção estabelece o embasamento teórico do estudo, detalhando a evolução e os princípios da AM como um processo de fabricação por adição de camadas. Na sequência, discute-se o paradigma da I4.0, com foco na digitalização e em tecnologias habilitadoras, como a Internet das Coisas (IoT) e os Sistemas Ciberfísicos (CPS). Por fim, examina-se a convergência entre AM e I4.0, destacando sua relevância estratégica para a personalização em massa, a sustentabilidade e a eficiência operacional da manufatura contemporânea.

Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva, em inglês Additive Manufacturing (AM), surgiu em 1892, quando Blather propôs a criação de objetos em camadas com folhas de cera empilhadas. O avanço significativo ocorreu nos anos 1980, com a criação da estereolitografia (SLA) pela 3D Systems em 1983 e da modelagem por fusão de material (FDM) por Scott Crump em 1990. Projetos como o RepRap e impressoras da Ultimaker popularizaram a tecnologia, impulsionando seu crescimento global (Lira, 2021).

A AM é definida como um processo de fabricação baseado na adição sucessiva de material em camadas, guiado por informações obtidas diretamente de uma representação geométrica computacional 3D. Essa abordagem destaca-se pelo elevado grau de automação, exigindo intervenção humana predominantemente nas etapas de pré e pós-processamento. Durante a execução, o equipamento opera de forma autônoma, processando dados geométricos sem necessidade de assistência contínua. Ao romper com as limitações dos processos tradicionais de manufatura, a AM possibilita a produção de geometrias complexas. Tamanha é sua relevância que a revista *The Economist* a apontou como o pilar de uma nova revolução industrial (Volpato, 2021).

A tecnologia AM permite a produção de bens personalizados com custos de desenvolvimento reduzidos, prazos de entrega mais curtos, menor consumo de energia durante a fabricação e menor desperdício de material (Prashar et al., 2023). Nesse contexto, Mehrpouya et al. (2019) destaca que a evolução da AM transformou o processo de fabricação, proporcionando vantagens como personalização em massa, prototipagem rápida, produção sustentável e redução de tempo e custos. Inovações recentes, como bioprinting, impressão 4D, nanoimpressão e impressão de metamateriais, ampliaram ainda mais seu potencial. Como resultado, a tecnologia democratizou a produção, possibilitando que pequenas empresas e usuários desenvolvam seus próprios designs e produtos inovadores, atuando como auto designers e fabricantes independentes.

Indústria 4.0

Também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, caracteriza-se pela digitalização dos processos produtivos e pela introdução do conceito de Fábrica Inteligente, do inglês Smart Factory (Quintino et al., 2019). Nesse cenário, pode-se definir a I4.0 como um sistema produtivo altamente integrado, no qual computadores e dispositivos móveis conectados à internet ou intranet possibilitam a programação, o gerenciamento, a cooperação e a interação remota com os processos industriais (Sátyro et al., 2018).

Segundo Dilberoglu et al. (2017), a I4.0 impulsionou a automação inteligente e a integração de tecnologias avançadas, elevando a competitividade econômica. Esse avanço ocorre por meio da combinação de sistemas cibernéticos e físicos, que dão origem às fábricas inteligentes e redefinem o papel humano na produção. Tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), Big Data e Computação em Nuvem desempenham um papel essencial nesse contexto, pois viabilizam a coleta de dados de dispositivos físicos via redes digitais, além de permitir a análise e o processamento de grandes volumes de informações gerados pelas máquinas, facilitando seu armazenamento e transferência (Prashar & Vasudev, 2021; Dilberoglu et al., 2017).

De acordo com Singh et al. (2021), a IoT e a manufatura em nuvem (CM) permitem a digitalização completa do processo de impressão 3D. Essa evolução é reforçada por Prashar e Vasudev (2021), ao destacar que, no contexto da I4.0, o foco tem se voltado para a fabricação em larga escala, levando as empresas a adotarem sistemas integrados como estratégia para reduzir custos. Alguns fabricantes até mesmo já disponibilizam Interfaces de Programação de Aplicações (APIs), facilitando automação, monitoramento remoto e coleta de dados sem a necessidade de intervenção manual, que permitem a conexão direta com as impressoras, porém a falta de padronização dificulta a integração, tornando o processo mais complexo e oneroso (Prashar & Vasudev, 2021).

Integração Entre a Manufatura Aditiva e Indústria 4.0

A AM é um componente crucial para a I4.0 e para o conceito de manufatura inteligente. Sua relevância é destacada pela capacidade de permitir a personalização em massa e gerar um impacto ambiental positivo, posicionando-a como uma alternativa mais sustentável em relação aos métodos tradicionais. Seus benefícios abrangem o uso eficiente de recursos, o aumento da durabilidade dos componentes e a reconfiguração estratégica da cadeia de valor. No entanto, o desenvolvimento da AM historicamente concentrou-se em tecnologias de produção isoladas, carecendo de uma visão integrada do sistema de manufatura (Mehrpouya et al., 2019).

A plena integração com a I4.0 pode impulsionar a aplicação da AM para além da prototipagem e de nichos especializados, expandindo-a significativamente para a fabricação de pequenos lotes e produções sob demanda. Essa expansão permite um grau mais elevado de customização e a manufatura de designs complexos, muitas vezes inviáveis por métodos convencionais. A adoção de sistemas descentralizados e de alto desempenho, inerentes à I4.0, é essencial para essa evolução. Tais sistemas demonstram potencial para reduzir drasticamente os custos logísticos e de estoque (Barbosa, 2020), otimizando a agilidade operacional. Como observado por Prashar et al. (2023), a AM já transforma os processos de design e produção ao possibilitar a criação ágil e econômica de estruturas complexas, fator que solidifica sua posição central na fábrica do futuro.

METODOLOGIA

Apresenta-se o método fundamentado na Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC), com o roteiro TEMAC, que pressupõe três etapas distintas (Mariano & Rocha, 2017): a primeira, denominada "Preparação da pesquisa", consiste na definição das palavras-chave, do recorte temporal, das Bases de Dados (BD) e das áreas do conhecimento; a segunda etapa, nomeada "Apresentação e inter-relação dos dados", abrange a coleta, a classificação e a seleção dos dados sob diversos aspectos bibliométricos; e a etapa final, intitulada "Detalhamento, modelo integrador e validação por evidências", na qual são realizadas análises de rastreamento bibliográfico para identificação de núcleos de cocitação, coautoria e acoplamento bibliográfico. Complementarmente ao método original, este estudo incorporou uma análise temática qualitativa mediante a construção de Matrizes de Evidências, permitindo a categorização e o cruzamento dos principais benefícios, desafios e tendências identificados no portfólio final de artigos.

Utilizaram-se as BD Web of Science (WoS) e Scopus para a coleta e construção do portfólio, empregando-se uma planilha eletrônica para o tratamento e organização dos registros exportados. O software VOSviewer® permitiu a análise gráfica dos dados bibliométricos por meio de mapas de calor e redes de inter-relação, enquanto a ferramenta TagCrowd® foi utilizada para analisar a frequência de termos via nuvens de palavras-chave. Por fim, com base nos critérios da revisão sistemática da literatura e do método TEMAC, selecionaram-se os trabalhos mais relevantes sobre o impacto da AM na modernização industrial, cujos conceitos e tecnologias fundamentaram as abordagens deste estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Etapa 1 do Temac - Preparação da Pesquisa

A partir da definição do tema de pesquisa, identificaram-se palavras-chave relacionadas, as quais foram traduzidas para o inglês com o objetivo de tornar a busca mais precisa nas BD. A estratégia de busca adotada foi: ("3D printing" OR "additive manufacturing" OR "3D manufacturing technologies") AND ("industrial applications" OR "industrial processes" OR "manufacturing industries" OR "industrial production") AND ("sustainability" OR "sustainable manufacturing" OR "green production"). A pesquisa foi realizada no dia 3 de dezembro de 2024, utilizando bases amplamente reconhecidas por sua credibilidade e relevância acadêmica: Scopus e WoS.

Na Scopus, a busca inicial retornou 214 resultados, ainda sem filtros aplicados. Para refinar os dados, foram definidos os seguintes critérios: período entre 2018 e 2024, tipos de documentos restritos a artigos, artigos de revisão e artigos de conferência, idioma limitado ao inglês, área de estudo focada em Engenharia e Ciência dos Materiais e palavras-chave como fabricação de aditivos, aditivos, impressão 3D, impressoras 3D, desenvolvimento sustentável e sustentabilidade. Com essas filtragens, o número de resultados foi reduzido para 102. Já sob a perspectiva da WoS, a busca inicial retornou 91 resultados. Após a aplicação de filtros semelhantes, período entre 2018 e 2024 e restrição aos tipos de documentos mencionados anteriormente, o número de resultados foi reduzido para 87.

Etapa 2 do TEMAC - Apresentação e Inter-Relação dos Dados

A análise das fontes de publicação mais relevantes que abordam o tema de estudo na base de dados Scopus é o ponto de partida desta etapa. Notou-se que as revistas Journal of Cleaner Production (com 6 registros), Sustainable Materials and Technologies (com 5 registros) e Additive Manufacturing (com 4 registros) lideram em número de publicações. Juntas, estas três revistas representam cerca de 14,7% do total de 102 documentos analisados, sublinhando sua importância como fontes primárias para divulgação de pesquisas neste campo (Tabela 1).

Tabela 1. Revistas que mais publicam sobre o tema de acordo com a base Scopus

Títulos	Contagem do registro	% de 102	Número de citações
Journal of Cleaner Production	6	5,88%	365.301
Sustainable Materials and Technologies	5	4,90%	3.390
Additive Manufacturing	4	3,92%	145.344

Fonte: Dados coletados em janeiro de 2025.

Contudo, a diferença nas métricas de impacto. Enquanto o Journal of Cleaner Production lidera com folga o número de citações, atingindo 365.301, demonstrando a alta influência e longevidade de seus artigos na área, a revista Additive Manufacturing aparece em segundo lugar com 145.344 citações. A revista Sustainable Materials and Technologies, apesar de relevante no volume de registros, apresenta um número de citações significativamente menor (3.390), sugerindo que, embora esteja ativamente publicando sobre o tema, seu impacto em termos de citação é mais recente ou concentrado em publicações fora do período de maior acúmulo de citações das demais.

Para complementar a análise de volume de publicações, torna-se essencial avaliar o grau de relevância e influência dos periódicos no campo de conhecimento. A métrica padrão para essa estimativa foi o Fator de Impacto (Journal Impact Factor - JIF), consultado no Journal Citation Report (JCR). Ao filtrar os periódicos pela categoria Engineering e Manufacturing (ou Engenharia e Manufatura), (Tabela 2), a revista Additive Manufacturing demonstra um destaque notável, com um Fator de Impacto de 10.3, posicionando-se em 4º lugar entre as 10 mais relevantes da área, o que reforça sua importância, não apenas pelo volume de publicações sobre o tema (Tabela 1), mas também pela alta qualidade e impacto científico de seus artigos. Este dado corrobora a sua relevância estratégica para a pesquisa analisada.

Tabela 2. Revistas com maior fator de impacto na área de Engineering e Manufacturing

Revista	JIF	Classificação
International Journal of Extreme Manufacturing	16.1	1
International Journal of Machine Tools & Manufacture	14.0	2
Journal of Manufacturing Systems	12.3	3
Additive Manufacturing	10.3	4
Virtual and Physical Prototyping	10.2	5
International Journal of Production Economics	9.8	6
Robotics and Computer - Integrated Manufacturing	9.1	7
Composites Part A - Applied Science and Manufacturing	8.1	8
Journal of Manufacturing Technology Management	7.3	9
International Journal of Production Research	7.0	10

Fonte: Dados coletados da base InCites Journal Citation Reports (JCR) em janeiro de 2025.

Após identificar os periódicos de maior destaque, o foco da análise se desloca para os documentos mais influentes do campo, medidos pelo total de citações. Assim, a Tabela 3 apresenta os artigos com maior número de citações nas BD Scopus e WoS, respectivamente, permitindo a identificação das principais contribuições científicas e das tendências temáticas relacionadas à AM e I4.0. Quanto a base Scopus (Tabela 3), os artigos mais citados destacam a centralidade da AM na I4.0 e sua relação com a sustentabilidade. O trabalho de Mehrpouya et al. (2019), com 290 citações, ilustra o potencial da AM no contexto da fábrica inteligente, enquanto Javaid et al. (2021), com 234 citações, foca no papel das aplicações da AM na sustentabilidade ambiental. Adicionalmente, Majeed et al. (2021), com 230 citações, sublinha a importância de Big Data para uma AM sustentável e inteligente.

Tabela 3. Documentos mais citados na BD Scopus

Título	Autores	Ano	Citações
The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: a review	Mehrpouya et al.	2019	290
Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability	Javaid et al.	2021	234
A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing	Majeed et al.	2021	230
A comprehensive review on sustainable cold spray additive manufacturing: state of the art, challenges and future challenges	Prashar e Vasudev	2021	147
A review of polymer-based materials for fused filament fabrication (fff): focus on sustainability and recycled materials	Fico et al.	2022	144

Fonte: Dados em janeiro de 2025.

Já na Tabela 4 (WoS), estudos mais influentes incluem uma visão geral sobre as tecnologias de AM e seus impactos ambientais, como os trabalhos de Jiménez et al. (2019), com 208 citações, e Khosravani e Reinicke (2020), com 170.

Tabela 4. Documentos mais citados na BD WoS

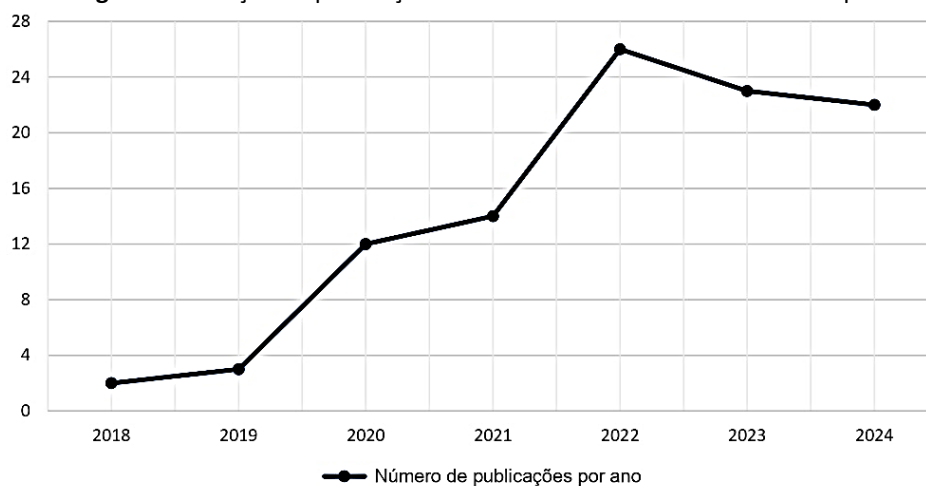
Título	Autores	Ano	Citações
Additive manufacturing technologies: an overview about 3d printing methods and future prospects	Jiménez et al.	2019	208
The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: a review	Mehrpouya et al.	2019	203
Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability	Javaid et al.	2021	170
On the environmental impacts of 3D printing technology	Khosravani & Reinicke	2020	170
A review of polymer-based materials for fused filament fabrication (FFF): focus on sustainability and recycled materials	Fico et al.	2022	120

Fonte: Dados coletados em janeiro de 2025.

Ao analisar comparativamente, identificou-se a repetição de três artigos-chave entre as duas BD (Scopus e WoS), o que reforça a robustez e universalidade da influência desses estudos na área. Notavelmente, “The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: a review” (Mehrrouya et al., 2019) figura consistentemente no topo, ou próximo, em ambas as bases. Essa convergência comprova que as tendências mais relevantes da área abrangem, simultaneamente, avanços tecnológicos (visão geral de métodos, Big Data) e preocupações ambientais (sustentabilidade, impactos ambientais). Essa dualidade de foco é crucial e espelha as exigências para o desenvolvimento sustentável e a modernização da I4.0.

A análise temporal da produção científica é fundamental para identificar a dinâmica e a evolução do interesse acadêmico pela AM no setor industrial ao longo dos anos. Assim, as Figuras 1 e 2 ilustram a evolução anual do número de publicações no período de 2018 a 2024. Ambos os gráficos demonstrando uma trajetória clara de crescimento no volume de publicações, refletindo a crescente relevância do tema na literatura, apesar de apresentarem diferenças no padrão de evolução temporal.

Figura 1. Evolução da publicação de documentos na base de dados Scopus

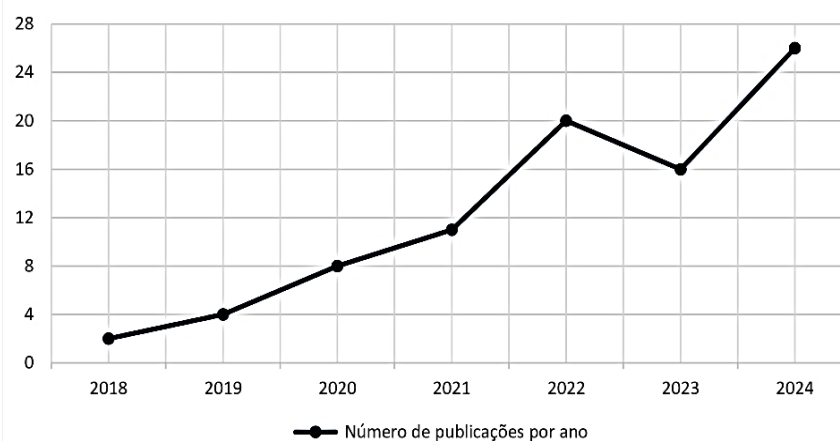


Fonte: Autores (2025).

Na base Scopus (Figura 1), a produção científica partiu de dois documentos em 2018, apresentando um crescimento mais acentuado a partir de 2020 (12 publicações), culminando em um pico expressivo no ano de 2022, com 26 publicações. Nos anos subsequentes, o padrão indica uma estabilização (com 23 em 2023 e 22 em 2024), sugerindo que o interesse de pesquisa atingiu um patamar de consolidação naquele ano.

Já na base WoS, a curva de crescimento foi mais consistente e prolongada. Após o crescimento inicial, o volume atinge ponto máximo mais tardiamente (2024), com 27 documentos. Notável, embora 2022 tenha registrado aumento (20 publicações), houve uma leve retração em 2023 (18), seguida pelo crescimento que culminou no pico em 2024.

A principal divergência entre os conjuntos de dados reside no comportamento dos picos de publicação. A antecipação do pico na Scopus (2022) e crescimento continuado na WoS, até 2024, podem ser atribuídos às diferenças na cobertura de periódicos, critérios de indexação ou velocidade de processamento de novas publicações entre bases. De forma geral, os valores absolutos na Scopus são marginalmente superiores na maior parte dos anos, mas a tendência clara em ambas é o aumento da visibilidade da AM na pesquisa industrial (Figura 2).

Figura 2. Evolução da publicação de documentos na base de dados WoS

Fonte: Autores (2025).

A análise também permitiu identificar os centros de pesquisa mais ativos no tema. O mapeamento revela uma forte participação de nações asiáticas e ocidentais. No Scopus, a Índia lidera com 25 publicações (24,51% do total), seguida pelos Estados Unidos e pela China, cuja produção também é expressiva (18 e 13 publicações, respectivamente). Já no WoS, o cenário de liderança é disputado pela Itália (18 publicações; 20,69%) e Estados Unidos (17 publicações; 19,54%). A Índia ocupa a terceira posição neste banco, com 16 publicações (18,39%) (Tabela 5).

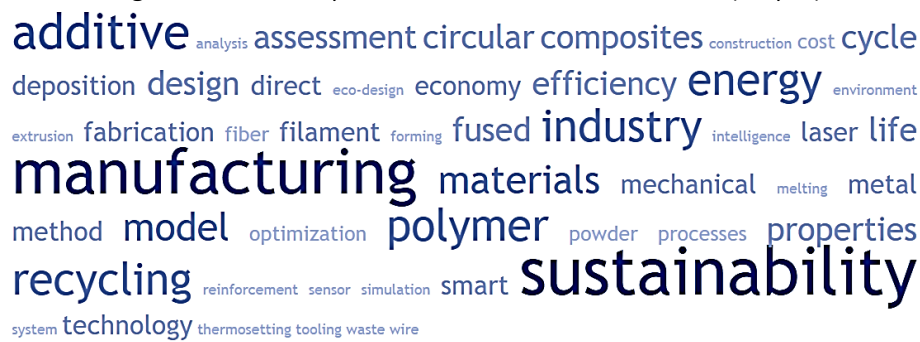
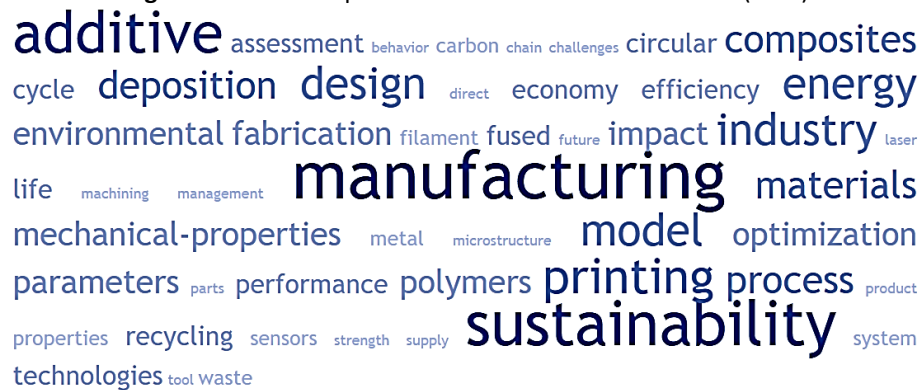
Tabela 5. Documentos publicados nas BD WoS e Scopus por países e regiões

Países/Regiões	Scopus		WoS	
	Contagem de registros	% de 102	Contagem de registros	% de 87
Índia	25	24,51%	16	18,39%
Estados Unidos	18	17,65%	17	19,54%
China	13	12,75%	11	12,64%
Itália	13	12,75%	18	20,69%
Reino Unido	13	12,75%	6	6,90%

Fonte: Dados coletados em janeiro de 2025.

A análise comparativa destaca que a Índia, os Estados Unidos, a Itália e a China consolidam-se como os principais polos globais de pesquisa em AM no recorte estudado. Observam-se, contudo, variações significativas conforme o indexador: enquanto a Índia detém uma concentração expressiva de publicações na base Scopus, a Itália e os Estados Unidos manifestam uma presença mais equilibrada ou proeminente na WoS. De modo geral, essa distribuição reflete o caráter globalizado do tema, integrando a vanguarda tecnológica de nações emergentes à expertise das potências industriais consolidadas. Tal disparidade entre as BD ratifica a necessidade de adotar múltiplos indexadores para capturar com precisão a abrangência da produção científica contemporânea.

A etapa final da análise bibliométrica envolve a identificação dos tópicos de pesquisa por meio das palavras-chave. As nuvens de palavras, elaboradas com a ferramenta TagCrowd® e baseadas nas palavras-chave dos documentos da Scopus (Figura 3) e WoS (Figura 4), demonstram uma convergência temática significativa entre as bases. Observa-se que as palavras-chave com maior destaque são praticamente as mesmas: manufacturing, sustainability, additive, industry, energy, materials e model.

Figura 3. Nuvem de palavras dos documentos indexados (Scopus)**Figura 4.** Nuvem de palavras dos documentos indexados (WoS)

Fonte: Autores (2025).

Uma diferença notável é a maior ênfase na palavra “printing” na nuvem da WoS (Figura 4), enquanto “recycling” e “polymer” parecem ter um destaque marginalmente maior na nuvem da Scopus (Figura 3). De forma geral, a forte repetição dos termos chave (em especial “manufacturing” e “sustainability”) sugere que a pesquisa está firmemente concentrada na fusão entre a tecnologia de manufatura aditiva e os imperativos de sustentabilidade/eficiência energética na indústria moderna.

A Etapa 2 do TEMAC revelou um crescimento acentuado na produção científica, liderada por periódicos de alto impacto e países como Índia e Estados Unidos. A convergência temática observada entre as bases Scopus e WoS, especialmente nas palavras-chave dominantes e nos artigos mais citados, valida o foco do estudo na interconexão entre avanço tecnológico e imperativos ambientais. Com esta visão geral consolidada, o foco da pesquisa prossegue para a Etapa 3, dedicada ao rastreamento bibliográfico com o objetivo de identificar os núcleos de cocitação, coautoria e de acoplamento bibliográfico.

Etapa 3 do TEMAC - Detalhamento, Integração e Validação por Evidências

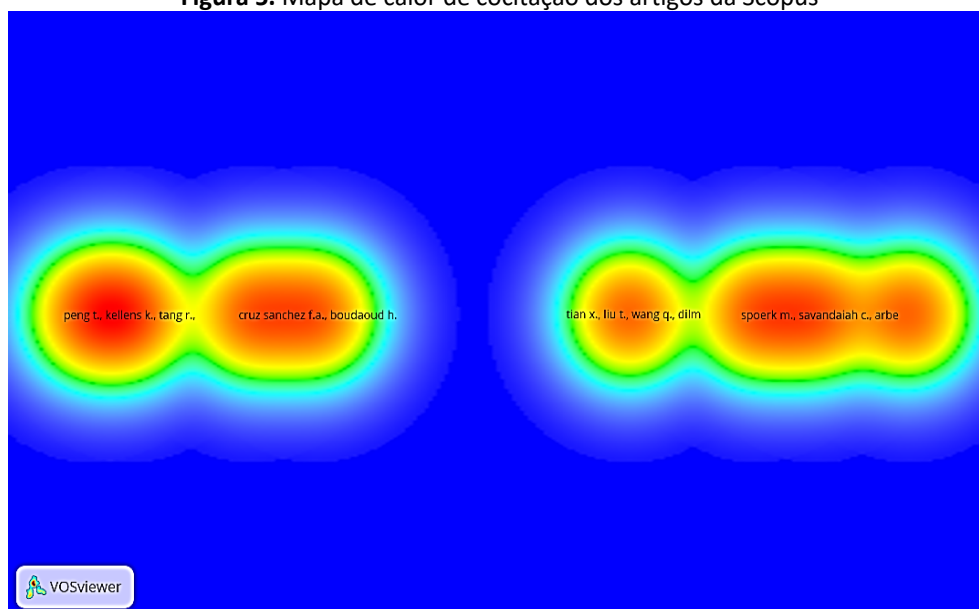
O software VOSviewer® foi empregado nesta etapa para gerar mapas de calor a partir dos dados bibliométricos coletados no Scopus e WoS. O objetivo é complementar as métricas quantitativas e identificar visualmente as estruturas temáticas e as redes de colaboração mais relevantes na análise do impacto da AM na modernização industrial. No total, foram elaborados 6 mapas, três para cada base, representando cocitações, coautorias e acoplamento bibliográfico.

Ressalta-se que, nos mapas de densidade, a escala de cores reflete relevância. Tons quentes, (vermelho e amarelo), destacam itens de maior impacto ou frequência, e os tons frios, (azul), indicam menor densidade. Ademais, o tamanho da fonte é diretamente proporcional à frequência de ocorrência ou intensidade da cocitação do autor ou referência analisada.

Análise de Cocitação de Autores (Redes de Influência)

Os mapas de densidade gerados por meio da análise de cocitação a seguir revelam os autores citados conjuntamente com maior frequência, evidenciando as principais redes de influência intelectual e as fundações teóricas da área. Por exemplo, o mapa de cocitação de autores na Scopus (Figura 5) revela uma estrutura bipolarizada, caracterizada por dois grandes domínios de conhecimento que, embora compartilhem o tema central da AM, apresentam focos distintos de fundamentação teórica. O primeiro desses domínios, situado à esquerda do mapa, estabelece o polo de eficiência e sustentabilidade. Este sendo o núcleo de maior intensidade térmica e destacando Peng, Kellens e Tang. Também, a proximidade e sobreposição de cores quentes, entre esses nomes, indicaram que seus artigos foram sistematicamente citados em conjunto, representando a base teórica voltada à modelagem de energia, avaliação de ciclo de vida e sustentabilidade nos processos de manufatura. Observa-se assim, uma extensão desse polo, e influência de Cruz Sanchez e Boudaoud, sugerindo uma transição orgânica para estudos focados em reciclagem e economia circular.

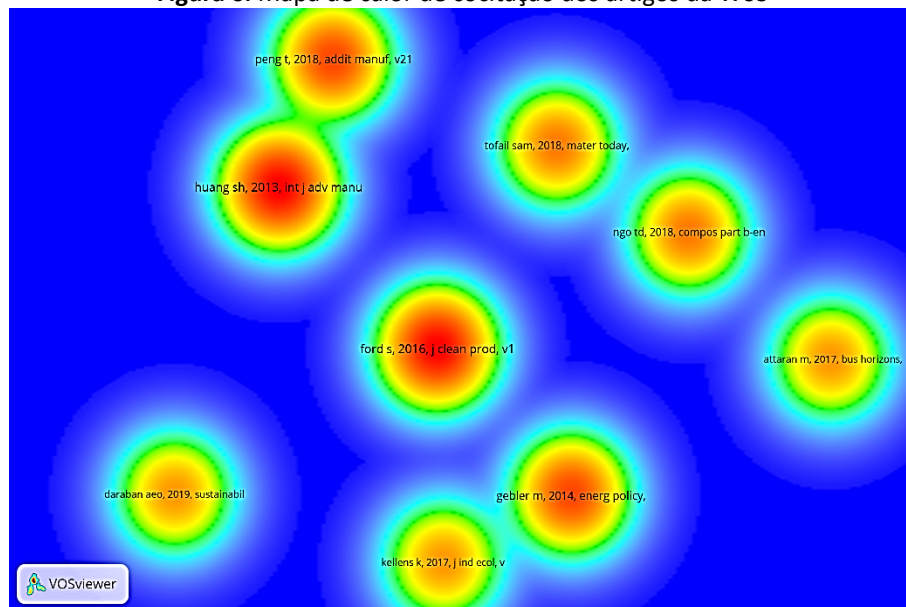
Figura 5. Mapa de calor de cocitação dos artigos da Scopus



Fonte: Autores (2025).

Em contrapartida, o segundo domínio, localizado à direita do mapa, apresenta uma estrutura mais linear e define o polo de processos e materiais. Esta região indica uma rede de influência concentrada nos aspectos estritamente técnicos da AM. Nela, autores como Tian, X., Liu, T. e Wang, Q. formam um subgrupo centralizado em tecnologias de fabricação e métodos de deposição. Simultaneamente, o extremo direito desse polo é dominado pela densidade de Spoerk, M. e Savandaiah, C., cujas pesquisas fundamentam discussões essenciais sobre a extrusão de materiais e o comportamento de polímeros.

Diferente da estrutura bipolarizada observada na Scopus, o mapa de densidade da WoS (Figura 6) revela uma organização intelectual mais integrada, orbitando em torno de obras que conectam a tecnologia ao impacto industrial e ambiental. O núcleo de maior intensidade térmica e centralidade é representado pelo estudo de Ford e Despeisse (2016) que fundamenta a discussão sobre as vantagens e os desafios da sustentabilidade na Manufatura Aditiva.

Figura 6. Mapa de calor de cocitação dos artigos da WoS

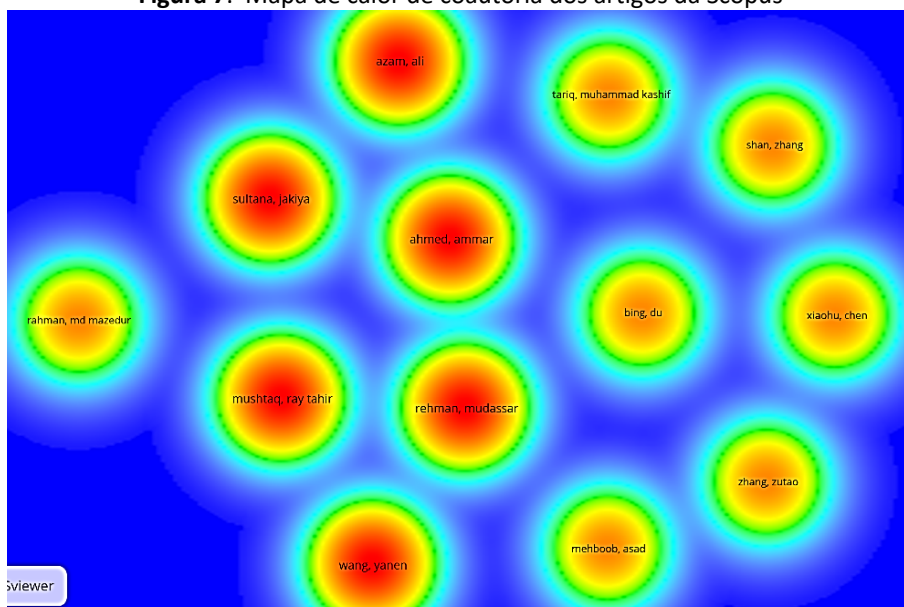
Fonte: Autores (2025).

Próximos a esse centro, formam-se zonas de alta densidade que representam pilares de revisão e tendências da área. Destacam-se os trabalhos de Huang et al. (2013), focado nos impactos sociais e industriais, e Tofail et al. (2018), que aborda os desafios científicos e as oportunidades de mercado da tecnologia. A forte coesão espacial entre esses documentos e o núcleo central sugere que a literatura indexada na WoS compartilha uma base teórica robusta e interdisciplinar.

Nas zonas periféricas, mas ainda com relevância significativa, observam-se especializações temáticas distintas. Na porção superior, Peng e Sun (2018) consolidam a vertente de modelagem energética, enquanto na base do mapa, Kellens et al. (2017) representam a investigação do impacto ambiental e da pegada ecológica dos processos. Essa variação estrutural, caracterizada pela segmentação na Scopus frente à coesão observada na WoS, reflete particularidades na indexação e na diversidade de periódicos de cada base. Tais nuances resultam em uma arquitetura de conhecimento que se apresenta de forma mais distribuída em um índice e mais agregada no outro, justificando a abordagem metodológica híbrida adotada nesta pesquisa.

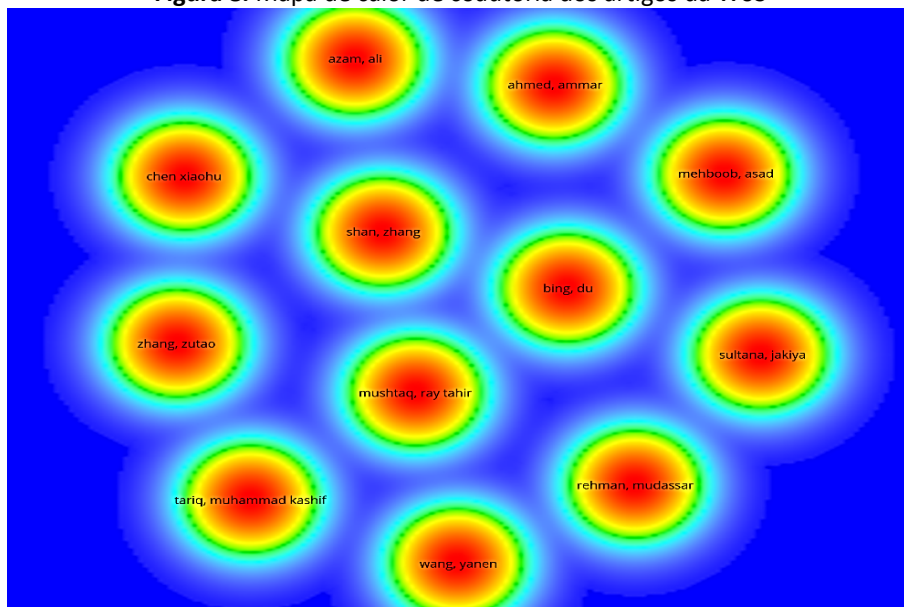
Análise de Coautoria (Redes de Colaboração)

O aspecto mais notável em ambas as bases é a configuração da rede em grupos altamente coesos, porém majoritariamente isolados entre si. O mapa da Scopus (Figura 7) ilustra diversos núcleos de alta densidade térmica. Autores como Ammar Ahmed, Ray Tahir Mushtaq, Mudassar Rehman e Jakiya Sultana demonstram uma conectividade intragrupo muito forte. A sobreposição das áreas de calor entre esses nomes sugere a existência de um grupo de pesquisa centralizado e produtivo, com parcerias sistemáticas e recorrentes.

Figura 7. Mapa de calor de coautoria dos artigos da Scopus

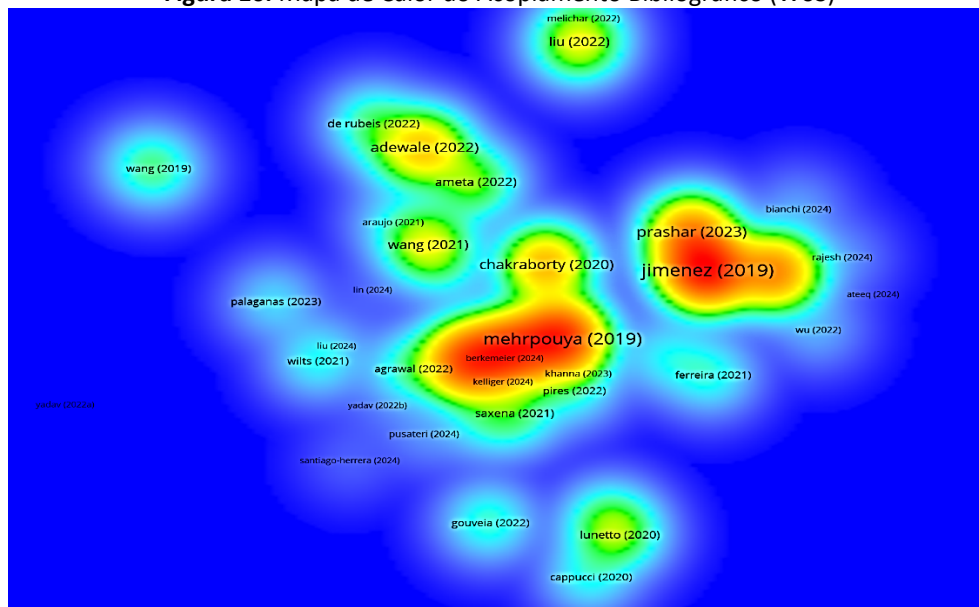
Fonte: Autores (2025).

A Figura 8 (WoS) exibe uma topologia semelhante, caracterizada pela presença de múltiplos agrupamentos distintos. Pesquisadores como Ali Azam, Ammar Ahmed, Du Bing, Zhang Shan e Ray Tahir Mushtaq destacam-se como nós centrais em suas respectivas redes. A recorrência de nomes como Ammar Ahmed e Ray Tahir Mushtaq em ambas as bases reforça sua liderança e papel de destaque na produção científica global sobre o tema.

Figura 8. Mapa de calor de coautoria dos artigos da WoS

Fonte: Autores (2025).

A presença de múltiplos agrupamentos separados indica que a colaboração é robusta e intensa dentro dos grupos, evidenciada pela proximidade e sobreposição das áreas de densidade entre os autores, mas é restrita e limitada entre eles. Essa estrutura de rede fragmentada também reforça o caráter geográfico da produção científica, uma vez que muitos núcleos representam grupos de pesquisa localizados em uma mesma instituição, país ou bloco regional, que publicam em conjunto, mas não estabelecem colaborações sistemáticas com grupos de outras regiões.

Figura 10. Mapa de Calor do Acoplamento Bibliográfico (WoS)

Fonte: Autores (2025).

Em síntese, o acoplamento bibliográfico demonstra a interdependência e a maturidade do campo. A convergência da pesquisa para dois pilares fundamentais fica evidente: a consolidação da AM como tecnologia-chave da Indústria 4.0 e seu papel crítico no impulsionamento da eficiência produtiva com redução de impactos ambientais.

ANÁLISE TEMÁTICA E MATRIZES DE EVIDÊNCIAS

O portfólio final de artigos do presente estudo é composto pelos oito documentos mais citados e influentes identificados nas etapas bibliométricas anteriores. A partir da leitura integral desse portfólio, realizou-se uma análise qualitativa com base em Matrizes de Evidências, detalhando as contribuições e limitações da Manufatura Aditiva. Assim, os achados permitem elucidar os principais benefícios, desafios e tendências que definem a contribuição da AM para a modernização industrial e para a I4.0.

Benefícios da Manufatura Aditiva

A AM é amplamente reconhecida na literatura como uma tecnologia com alto potencial transformador para a indústria, conforme sumarizado na Matriz de Evidências apresentada no Quadro 1. O principal achado é o consenso absoluto da literatura (8 em 8 artigos) sobre a Sustentabilidade como o maior benefício da tecnologia. Este resultado valida o foco temático e a relevância do presente estudo. Sendo que os benefícios de consenso moderado (entre 5 e 7 menções) confirmam a força da AM em seus pilares de valor: Redução de desperdício e Flexibilidade no design (vantagens técnicas); e Personalização/Customização (vantagens de mercado). O benefício de Redução de custo logístico apresenta relevância análoga, ressaltando o potencial de produção *on-demand* e descentralizada, o que mitiga a necessidade de grandes estoques e transporte de longa distância.

Quadro 1. Benefícios da Manufatura Aditiva

Benefícios	Artigos							
	Adewale et al. (2022)	Chakraborty & Biswas (2020)	Javaid et al. (2021)	Jiménez et al. (2019)	Mehrpouya et al. (2019)	Prashar & Vasudev	Prashar et al. (2023)	Wang et al. (2021)
Redução de tempo de produção					X	X		
Sustentabilidade	X	X	X	X	X	X	X	X
Personalização e customização	X	X	X		X	X		
Redução de desperdício de material	X	X	X	X	X	X	X	
Eficiência energética			X			X		X
Redução de custo logístico (transporte e estoque)		X	X		X	X	X	
Extensão da vida útil dos produtos						X		
Redução do peso das peças				X			X	
Flexibilidade no design	X	X		X	X	X	X	
Produção descentralizada		X					X	
Agilidade no desenvolvimento de novos produtos			X				X	X
Precisão e repetibilidade	X		X					

Fonte: Autores (2025).

As categorias de baixo consenso indicam áreas de benefício mais específicas ou emergentes, como a Produção descentralizada e a Redução do peso das peças (Jiménez et al., 2019; Prashar et al., 2023). Embora menos citadas no portfólio geral, tais características são apontadas como cruciais para nichos de alto desempenho, como a indústria aeroespacial e biomédica.

Desafios e Obstáculos da MA

O reconhecimento dos benefícios da MA é acompanhado de uma clara identificação de seus obstáculos atuais (Quadro 2). O desafio mais recorrente, com consenso total (8 em 8 artigos), é o Alto custo de materiais e equipamentos. Este é um obstáculo de natureza econômica que ainda restringe a escalabilidade e a adoção da tecnologia em larga escala.

Quadro 2. Desafios da Manufatura Aditiva

Desafios	Artigos							
	Adewale et al. (2022)	Chakraborty & Biswas (2020)	Javaid et al. (2021)	Jiménez et al. (2019)	Mehrpouya et al. (2019)	Prashar & Vasudev	Prashar et al. (2023)	Wang et al. (2021)
Alto custo de materiais e equipamentos	X	X	X	X	X	X	X	X
Tempo de produção elevado				X	X			
Restrição de materiais	X	X		X	X	X	X	
Restrição no tamanho das peças					X			
Imperfeições e qualidade das peças	X			X	X	X		X
Falta de regulamentação para garantir a padronização			X				X	X
Necessidade de pós-processamento (acabamento)			X			X	X	X
Sustentabilidade da reciclagem			X					
Impacto ambiental dos materiais usados			X					
Desafios na fabricação de tecidos flexíveis		X						
Propriedade intelectual e pirataria		X						X
Capacitação profissional							X	
Limitações técnicas (baixa velocidade de impressão e estabilidade térmica)								X
Escalabilidade	X				X			X

Fonte: Autores (2025).

Tendências e Projeções Futuras da AM

O (Quadro 3) reflete as respostas aos desafios identificados, com projeções sólidas para o Desenvolvimento de novos materiais e Expansão para novos setores (6 vezes cada e variando da saúde à moda).

Quadro 3. Tendências da Manufatura Aditiva

Tendências	Artigos							
	Adevale et al. (2022)	Chakraborty & Biswas (2020)	Javaid et al. (2021)	Jiménez et al. (2019)	Mehrpouya et al. (2019)	Prashar & Vasudev (2021)	Prashar et al. (2023)	Wang et al. (2021)
Integração com a I4.0			x		x		x	x
Desenvolvimento de novos materiais	x			x	x	x	x	x
Expansão para novos setores (aeroespacial, automotivo, saúde, moda, eletrônicos, dentre outros)	x		x	x	x	x	x	
Redução de custos e aumento da velocidade					x		x	
Uso de materiais ecológicos		x	x					
Automação				x	x	x		x
Produção descentralizada			x					
Sustentabilidade e Eficiência energética			x			x		
Impressão híbrida (técnicas tradicionais e a impressão 3D)		x					x	
Expansão para o mercado de roupas inteligentes		x						
Integração com a Medicina	x							x
Popularização da impressão 3D		x		x				x
4D Printing	x							
Integração com outras tecnologias (manufatura subtrativa e IA)				x				

Fonte: Autores (2025).

O Desenvolvimento de novos materiais e a Automação são tendências que buscam mitigar diretamente os desafios de restrição de materiais e alto custo. Além disso, a Integração com a I4.0 (mencionada 4 vezes) consolida o papel da AM como tecnologia-habilitadora, ligando-a a sistemas inteligentes, Inteligência Artificial (IA) e Big Data. As tendências emergentes como a Impressão Híbrida e a 4D Printing indicam rotas de pesquisa futuras para superar limitações técnicas e expandir as funcionalidades e a complexidade geométrica dos produtos. Assim, a análise dessas tendências sugere que o futuro da AM reside na superação coordenada dos gargalos técnicos e econômicos, aliada a uma integração plena com o ambiente digital, consolidando sua promessa de eficiência e sustentabilidade no cenário industrial global.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo objetivou mapear e analisar as principais contribuições da literatura sobre o impacto da Manufatura Aditiva na modernização industrial, utilizando o rigor metodológico da Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC). A aplicação deste método permitiu identificar os eixos de pesquisa dominantes e realizar uma análise aprofundada dos benefícios, desafios e tendências que moldam o desenvolvimento do campo.

Os resultados evidenciaram uma clara convergência da pesquisa em torno do eixo Sustentabilidade, o qual figura como o principal benefício e foco de interesse absoluto do portfólio analisado. O estudo demonstrou a consolidação de redes de influência intelectual e uma forte interdependência temática, com destaque para o trabalho de Mehrpouya et al. (2019) como núcleo teórico da área. Contudo, as redes de coautoria revelaram uma estrutura de colaboração fragmentada em agrupamentos majoritariamente isolados, indicando que a cooperação científica, embora intensa, ainda permanece restrita a núcleos específicos.

Apesar do potencial transformador da tecnologia em termos de flexibilidade de design e redução de desperdício, a pesquisa também revelou desafios persistentes. Notadamente, o alto custo de materiais e equipamentos, aliado à necessidade de aprimorar a qualidade e a padronização das peças, surge como o principal obstáculo à escalabilidade. Essas lacunas técnicas e econômicas representam as barreiras primordiais à plena integração da AM nos processos produtivos de larga escala.

A partir da identificação dessas lacunas, sugere-se que pesquisas futuras ampliem o foco na aplicação efetiva de variáveis emergentes da Indústria 4.0. Isso inclui estudos que detalhem a integração de Inteligência Artificial e a automação de processos para otimizar fluxos de trabalho e mitigar gargalos de custo e tempo. Adicionalmente, o campo se beneficiaria de investigações aprofundadas sobre a normatização e regulamentação da AM, essenciais para garantir a padronização e facilitar a adoção da tecnologia em setores de alta criticidade e rastreabilidade. Em suma, o amadurecimento da AM está condicionado à superação coordenada desses entraves, consolidando, enfim, sua promessa de eficiência e sustentabilidade no cenário industrial global.

REFERÊNCIAS

- Adewale, P., Yanchesme, M. S., & Lam, E. (2022). Starch modification for non-food, industrial applications: market intelligence and critical review. *Carbohydrate Polymers*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119590>
- Barbosa, P. V. (2020). Desafios das pequenas empresas para a inclusão da manufatura aditiva no contexto da Indústria 4.0 [Monografia de Graduação, Universidade Federal de Ouro Preto].
- Chakraborty, S. & Biswas, M. C. (2020). 3D printing technology of polymer-fiber composites in textile and fashion industry: A potential roadmap of concept to consumer. *Composite Structures*, 248, 112562. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112562>
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, A. B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- Fico, D., Rizzo, D., Casciaro, R., & Esposito Corcione, C. (2022). A review of polymer-based materials for fused filament fabrication (FFF): focus on sustainability and recycled materials. *Polymers*, 14(3), 465. <https://doi.org/10.3390/polym14030465>
- Ford, S. & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1191-1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>
- Javadi, M., Haleem, A., Bahl, S., Suman, R., & Vaidya, R. (2021). Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 312-322. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.07.005>
- Jiménez, M., Romero, L. R., & Domínguez, A. M. T. (2019). Additive manufacturing technologies: An overview about 3D printing methods and future prospects. *Complexity*, 1-30. <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
- Kellens, K., Baumann, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., & Duflou, J. R. (2017). Environmental dimensions of additive manufacturing: Mapping application domains and their environmental implications. *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), S49-S68. <https://doi.org/10.1111/jiec.12629>
- Khosravani, M. R. & Reinicke, T. (2020). On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today*, 20, 100689. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100689>
- Lira, V. M. (2021). *Processos de fabricação por impressão 3D: Tecnologia, equipamentos, estudo de caso e projeto de impressora 3D*. Editora Blucher.
- Majeed, A., Zhang, Y., Ren, S., Lv, J., Peng, T., Waqar, S., & Yin, E. (2021). A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 102026. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102026>
- Mariano, A. M. & Rocha, M. S. (2017). Revisão da literatura: Apresentação de uma abordagem integradora. *AEDEM International Conference*, 18, 427-442.
- Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvati, B., Vosoughnia, A., Gisario, A., & Berto, F. (2019). The potential of additive manufacturing in the smart factory industrial 4.0: a review. *Applied Sciences*, 9(18), 3865. <https://doi.org/10.3390/app9183865>

Peng, T. & Sun, W. (2018). Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. *Additive Manufacturing*, 21, 586-597. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>

Prashar, G., & Vasudev, H. (2021). A comprehensive review on sustainable cold spray additive manufacturing: State of the art, challenges and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127606. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127606>

Prashar, G., Vasudev, H., & Bhuddhi, D. (2023). Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17, 2221-2235. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00956-4>

Quintino, L. F., Souza, H. S., & Santos, M. M. S. (2019). Indústria 4.0. SAGAH.

Sátiro, W. C., Silva, V. C., & Costa, T. S. A. (2018). Indústria 4.0: conceitos e fundamentos. *Blucher*.

Singh, R., Gehlot, A., Akram, S. V., Gupta, L. R., Jena, M. K., Prakash, C., Singh, S., & Kumar, R. (2021). Cloud manufacturing, internet of things-assisted manufacturing and 3D printing technology: reliable tools for sustainable construction. *Sustainability*, 13(13), 7327. <https://doi.org/10.3390/su13137327>

Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>

Volpato, N. (2021). Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. *Blucher*.

Wang, Y., Ahmed, A., Azam, A., Bing, D., Shan, Z., Zhang, Z., Tariq, M. K., Sultana, J., Mushtaq, R. T., Mehboob, A., Xiaohu, C., & Rehman, M. (2021). Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: the knowledge evolution of 3D printing. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 709-733. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.023>