

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**KAUÊ REIS DE ALMEIDA DELGADO
LUCAS MATHEUS MOREIRA DE SOUSA**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA PARA A PRODUÇÃO DE
COMPONENTES DE DRONES**

São José dos Campos
2025

**KAUÊ REIS DE ALMEIDA DELGADO
LUCAS MATHEUS MOREIRA DE SOUSA**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE
MANUFATURA ADITIVA PARA A PRODUÇÃO DE
COMPONENTES DE DRONES**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.

Orientador: Prof. Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi

São José dos Campos
2025

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

DELGADO, Kauê Reis de Almeida

Análise e Otimização do Processo de Manufatura Aditiva para a Produção de Componentes de Drones. /Kauê Reis de Almeida Delgado, Lucas Matheus Moreira de Sousa– São José dos Campos, 2025.

38f.

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projetos de Estruturas Aeronáuticas. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2025.

Orientador Principal: Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi.

1. Manufatura aditiva. 2.Impressão 3D. 3. Otimização de processos. I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DELGADO, Kauê Reis de Almeida; SOUSA, Lucas Matheus Moreira de. **Análise e otimização do processo de manufatura aditiva para a produção de componentes de drones.** 2025. 38f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projetos de Estruturas Aeronáuticas) - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2025.

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA PARA A PRODUÇÃO DE COMPONENTES DE DRONES

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.



Prof. Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi - FATEC-SJC



Prof. Dr. Alfred Makoto Kabayama - FATEC-SJC



Prof. Me. Celso de Oliveira - FATEC-SJC

24 / 11 / 2025

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, pela força, proteção e sabedoria concedidas ao longo de toda a nossa trajetória acadêmica. Sua presença nos guiou e fortaleceu diante dos desafios enfrentados durante a elaboração deste trabalho.

Às nossas famílias, expressamos nossa mais profunda gratidão. Pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo, pela compreensão nos momentos de ausência e pela confiança depositada em nós mesmo nas fases mais difíceis.

Cada gesto de carinho, cada demonstração de apoio e cada sacrifício feito em nosso favor foram fundamentais para que chegássemos até aqui.

Estendemos nosso agradecimento aos professores que contribuíram para a nossa formação acadêmica e profissional. Seus ensinamentos, dedicação e compromisso nos inspiraram a buscar sempre a excelência.

Agradecemos, em especial, ao nosso orientador, Prof. Dr. Renato Galvão da Silveira Mussi, pela orientação atenta, pela disponibilidade e pela confiança que nos ofereceu durante todo o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos colegas e amigos que estiveram conosco nessa jornada, agradecemos pela parceria, pela troca de conhecimento, pela motivação mútua e pelo apoio nos momentos de maior pressão. Compartilhar essa caminhada tornou o processo mais leve e enriquecedor.

Por fim, agradecemos a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada palavra, gesto ou auxílio recebido teve importância singular na concretização desta conquista tão significativa para nós.

A todos, o nosso sincero muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho abordou a aplicação da manufatura aditiva na produção de componentes estruturais de drones, analisando seus aspectos tecnológicos, sustentáveis e a integração com a Indústria 4.0. O estudo teve como objetivo principal investigar como a manufatura aditiva pode contribuir para o aprimoramento da eficiência produtiva, da personalização e da sustentabilidade no desenvolvimento de drones. Para alcançar tal propósito, foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática e descritiva, com base em fontes obtidas nas plataformas Google Acadêmico, SciELO, PubMed e bibliotecas virtuais. Foram consultados livros, artigos, dissertações, teses e publicações recentes que abordam tecnologias de impressão 3D, otimização de parâmetros, uso de materiais reciclados e integração com inteligência artificial. Os dados coletados foram organizados, tabulados e analisados criticamente, permitindo identificar tendências, limitações e oportunidades no uso da manufatura aditiva. Os resultados demonstraram que o processo FDM se destacou como o mais adequado para a fabricação de drones de pequeno porte, devido ao baixo custo, boa precisão e facilidade de operação. Observou-se também que o controle de variáveis como temperatura, densidade de preenchimento e orientação das camadas influencia diretamente o desempenho mecânico das peças. Além disso, a utilização de materiais reciclados mostrou-se viável, reduzindo custos e impactos ambientais. A integração entre manufatura aditiva e inteligência artificial revelou potencial para elevar a precisão, a rastreabilidade e a sustentabilidade dos processos produtivos, consolidando essa tecnologia como um dos pilares da Indústria 4.0. Conclui-se que a manufatura aditiva é uma ferramenta estratégica para o futuro da engenharia de produção, permitindo inovação, personalização e sustentabilidade no setor de drones e em outras áreas industriais.

Palavras-Chave: Manufatura aditiva; Impressão 3D; Indústria 4.0; Inteligência artificial; Sustentabilidade; Drones.

ABSTRACT

This study addressed the application of additive manufacturing in the production of structural drone components, analyzing its technological, sustainable, and Industry 4.0 integration aspects. The main objective was to investigate how additive manufacturing contributes to improving production efficiency, customization, and sustainability in drone development. To achieve this goal, a systematic and descriptive literature review was conducted using sources from Google Scholar, SciELO, PubMed, and virtual academic libraries. Books, articles, theses, dissertations, and recent publications on 3D printing technologies, parameter optimization, use of recycled materials, and integration with artificial intelligence were examined. The collected data were organized, tabulated, and critically analyzed, identifying trends, limitations, and opportunities in additive manufacturing. The results showed that the FDM process proved to be the most suitable for small drone manufacturing due to its low cost, good precision, and operational simplicity. It was also observed that controlling variables such as temperature, infill density, and layer orientation directly influences mechanical performance. Furthermore, the use of recycled materials proved technically feasible, reducing costs and environmental impact. The integration of additive manufacturing and artificial intelligence demonstrated potential to increase precision, traceability, and sustainability in production processes, consolidating this technology as a key pillar of Industry 4.0. It was concluded that additive manufacturing is a strategic tool for the future of production engineering, enabling innovation, customization, and sustainability in drones and other industrial applications.

Keywords: Additive manufacturing; 3D printing; Industry 4.0; Artificial intelligence; Sustainability; Drones.

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivo Geral	10
1.2. Objetivos Específicos	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Conceitos e fundamentos da manufatura aditiva	11
2.2 Tecnologias e processos de manufatura aditiva	13
2.3 Otimização de parâmetros e desempenho mecânico	17
2.4 Sustentabilidade e uso de materiais reciclados em drones	20
2.5 Manufatura aditiva no contexto da Indústria 4.0 e IA	23
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	26
3.1 Procedimentos Metodológicos	26
3.2 Etapas de Análise e Estruturação dos Dados	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 Evolução e fundamentos tecnológicos da manufatura aditiva	28
4.2 Desempenho dos processos tecnológicos aplicados à manufatura aditiva	29
4.3 Parâmetros de otimização e desempenho mecânico	30
4.4 Sustentabilidade e uso de materiais reciclados	31
4.5 Integração com a Indústria 4.0 e Inteligência Artificial	32
5 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os drones deixaram de ser utilizados apenas para lazer e passaram a desempenhar papéis estratégicos em diversas áreas, como agricultura de precisão, engenharia civil, monitoramento ambiental, segurança pública e logística. Essa expansão gerou uma demanda crescente por modelos mais eficientes, leves, duráveis e adaptáveis às necessidades específicas de cada setor. No entanto, a fabricação de seus componentes ainda enfrenta desafios significativos, como altos custos de produção, complexidade no desenvolvimento de designs específicos e dificuldades na personalização de peças para aplicações particulares. Segundo Silva (2020), a utilização de drones na agricultura, por exemplo, tem demonstrado resultados satisfatórios em termos de cobertura e eficiência de aplicação, contribuindo para a redução do tempo de operação e dos custos com mão de obra.

Nesse contexto, a manufatura aditiva, ou impressão 3D, surge como uma alternativa inovadora, capaz de transformar a forma como os componentes dos drones são projetados e fabricados. Diferentemente dos métodos tradicionais de usinagem, que removem material de um bloco sólido, a manufatura aditiva constrói as peças camada por camada, reduzindo significativamente o desperdício de material e permitindo maior liberdade no design. Além disso, o processo é mais ágil, podendo atender a demandas pontuais ou personalizadas com mais facilidade, o que se alinha às exigências de um mercado que busca flexibilidade, inovação e eficiência. De acordo com Araújo (2021), a manufatura aditiva tem se destacado por possibilitar a criação de peças com geometrias complexas, utilizando menos material e reduzindo o tempo entre o projeto e a fabricação.

Apesar dessas vantagens, o uso da impressão 3D na produção de peças para drones ainda está em desenvolvimento. Desafios técnicos precisam ser superados, como o ajuste fino dos parâmetros de impressão para garantir a precisão dimensional, a escolha de materiais que apresentem bom desempenho mecânico e a viabilidade da aplicação em larga escala. Segundo Marques Júnior e Costa (2019), a impressão 3D contribui para a otimização dos processos de produção, permitindo a criação de ferramentas e peças personalizadas com geometrias complexas, além de reduzir os tempos de espera e os custos associados ao transporte de componentes e materiais.

Esse estudo propõe investigar, por meio de revisão teórica e atividades experimentais, como diferentes parâmetros de impressão influenciam diretamente na qualidade final das peças. Serão analisados os materiais mais indicados para a fabricação de componentes

estruturais de drones, bem como os formatos geométricos mais utilizados, visando encontrar soluções que unam desempenho, leveza e resistência.

A escolha deste tema está diretamente relacionada ao momento atual da tecnologia e da indústria. Com o avanço da automação e da mobilidade aérea, os drones vêm se consolidando como ferramentas indispensáveis para otimizar processos, reduzir custos operacionais e acessar áreas de difícil alcance. Portanto, buscar alternativas que melhorem a produção de suas peças não é apenas uma questão técnica, mas também estratégica para acompanhar as transformações do mercado.

1.1. Objetivo Geral

Analisar a aplicação da manufatura aditiva para a produção de componentes de drones, avaliando suas vantagens, limitações e impactos no processo de fabricação.

1.2. Objetivos Específicos

Para a consecução deste objetivo geral foram estabelecidos os objetivos específicos:

- Identificar os principais processos de manufatura aditiva aplicáveis à fabricação de componentes de drones.
- Comparar a manufatura aditiva com métodos tradicionais de produção quanto a custo, flexibilidade e características das peças.
- Avaliar como parâmetros de impressão influenciam as propriedades e a qualidade das peças produzidas.
- Analisar o potencial da manufatura aditiva para personalização e adaptação de componentes em projetos de drones.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos e fundamentos da manufatura aditiva

A manufatura aditiva é um processo de fabricação baseado na criação de peças por meio da adição sucessiva de camadas de material. Ao contrário dos métodos tradicionais, como usinagem ou moldagem, em que o material é retirado ou comprimido em moldes, a impressão 3D constrói o objeto diretamente a partir de um modelo digital. Isso permite fabricar geometrias complexas, reduzir desperdício e produzir componentes personalizados de forma rápida e eficiente.

Historicamente, a manufatura aditiva surgiu na década de 1980, quando Charles Hull desenvolveu o processo de estereolitografia (SLA) em 1983, considerado o marco inicial dessa tecnologia. Netto et al. (2024) destacam que, embora o conceito tenha mais de quatro décadas, sua popularização e consolidação industrial ocorreram a partir dos anos 2010, com a disseminação de impressoras 3D acessíveis e o avanço das ferramentas de modelagem tridimensional assistida por computador (CAD). Essa trajetória reflete a transição de uma técnica restrita à prototipagem rápida, utilizada principalmente em pesquisas e design de produtos, para um processo produtivo consolidado, capaz de gerar peças funcionais com desempenho equivalente ao de componentes fabricados por métodos tradicionais. Para Moreira, Bonfim e Liberato (2025), essa evolução está diretamente associada à convergência entre novas tecnologias digitais e os princípios da Indústria 4.0, que impulsionaram a integração entre sistemas ciberfísicos, automação e manufatura inteligente.

Do ponto de vista conceitual, a manufatura aditiva é definida por Moreira, Bonfim e Liberato (2025) como um processo no qual objetos tridimensionais são construídos camada por camada, a partir de dados geométricos gerados digitalmente, diferindo fundamentalmente da manufatura subtrativa por acrescentar material em vez de removê-lo. Essa distinção confere ao método uma série de vantagens técnicas: redução de desperdício, aumento da

eficiência no uso de recursos, e ampliação da liberdade de design, uma vez que permite a produção de estruturas internas complexas, leves e resistentes. Para os autores, essa flexibilidade possibilita não apenas a criação de protótipos funcionais, mas também a produção sob demanda, adaptada às necessidades específicas de cada cliente ou aplicação. Essa característica é particularmente relevante no contexto da engenharia aeronáutica e dos veículos aéreos não tripulados (VANTs), como os drones, que demandam componentes leves e personalizados.

Entretanto, as perspectivas sobre o conceito e o alcance da manufatura aditiva variam entre os estudiosos. Enquanto Moreira, Bonfim e Liberato (2025) enfatizam o papel da tecnologia na transformação digital da indústria, aproximando-a da Indústria 4.0, Netto et al. (2024) adotam uma abordagem mais pragmática, destacando os benefícios ambientais e econômicos advindos da redução do consumo de matéria-prima e da simplificação das etapas produtivas. Já Betim et al. (2024) contribuem com uma visão prospectiva voltada ao cenário brasileiro, prevendo o crescimento acelerado da manufatura aditiva até 2024, mas alertando para entraves como a falta de investimento, a escassez de mão de obra qualificada e as limitações tecnológicas que ainda restringem a adoção em larga escala. Essa diferença de enfoques evidencia que, embora haja consenso quanto ao potencial disruptivo da tecnologia, existem divergências quanto à velocidade e à profundidade de sua incorporação industrial, especialmente em países em desenvolvimento.

Para Maia e Cruz (2024), a aplicação da manufatura aditiva no setor aeronáutico exemplifica sua capacidade de redefinir o paradigma produtivo ao permitir a criação de componentes leves e altamente resistentes, reduzindo custos operacionais e o tempo de desenvolvimento de projetos. Os autores demonstram que a adoção dessa tecnologia nas aeronaves e drones está diretamente relacionada à possibilidade de fabricar peças personalizadas, eliminando processos de usinagem complexos e reduzindo o número de componentes necessários em uma estrutura. A pesquisa reforça, assim, a relação direta entre o avanço da manufatura aditiva e a busca por eficiência estrutural, característica essencial em projetos que priorizam leveza, desempenho aerodinâmico e economia de energia.

Contudo, Betim et al. (2024) observam que o amadurecimento da manufatura aditiva no Brasil ainda é limitado por questões estruturais e de investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D). Segundo os autores, há uma lacuna significativa entre o avanço acadêmico e a aplicação industrial, o que compromete a competitividade tecnológica do país frente a potências industriais como Estados Unidos, Alemanha e Japão. Além disso, há desafios quanto à padronização dos processos e à certificação de peças produzidas por

manufatura aditiva, fatores que dificultam a adoção da tecnologia em setores regulados, como o aeroespacial e o médico. Essa crítica é relevante, pois evidencia a necessidade de um esforço conjunto entre universidades, empresas e órgãos reguladores para garantir a qualidade, rastreabilidade e confiabilidade dos produtos gerados por processos aditivos.

Ainda sob uma perspectiva crítica, Moreira, Bonfim e Liberato (2025) destacam que, embora a manufatura aditiva ofereça liberdade de design e redução de desperdício, ela enfrenta limitações quanto à precisão dimensional e à resistência mecânica de algumas peças, principalmente quando comparada a processos subtrativos de alta precisão, como fresagem CNC. Além disso, a dependência de softwares de modelagem e simulação complexos, o custo elevado de materiais específicos e a necessidade de calibração precisa das máquinas ainda constituem obstáculos técnicos a serem superados. Netto et al. (2024) acrescentam que, no contexto brasileiro, esses desafios são amplificados pela escassez de profissionais capacitados para operar e otimizar sistemas de manufatura aditiva, o que reforça a importância da formação técnica especializada e do incentivo à inovação tecnológica.

A rastreabilidade digital é um dos pilares da Indústria 4.0 e permite acompanhar todas as etapas de fabricação da peça. Na manufatura aditiva, cada componente é associado a um conjunto de informações, como o modelo CAD, parâmetros de impressão, lote de material e condições de temperatura. Esse registro facilita a repetibilidade do processo, garante maior controle de qualidade e permite identificar rapidamente eventuais falhas. Em aplicações aeronáuticas, como drones, a rastreabilidade contribui para maior segurança e confiabilidade operacional.

Dentro do contexto deste estudo, que investiga a aplicação da manufatura aditiva na produção de componentes de drones, os fundamentos conceituais apresentados convergem para uma compreensão da tecnologia como instrumento de inovação, eficiência e personalização. As contribuições de Netto et al. (2024), Moreira, Bonfim e Liberato (2025), Betim et al. (2024) e Maia e Cruz (2024) demonstram que a manufatura aditiva não apenas amplia as possibilidades de design e reduz o desperdício de material, mas também impulsiona uma mudança estrutural no modo como produtos são concebidos e fabricados. Essa base teórica sustenta a análise proposta nesta pesquisa, permitindo compreender de que forma os princípios da adição de material, da modelagem digital e da fabricação em camadas podem ser aplicados ao desenvolvimento de drones mais leves, eficientes e tecnologicamente avançados.

2.2 Tecnologias e processos de manufatura aditiva

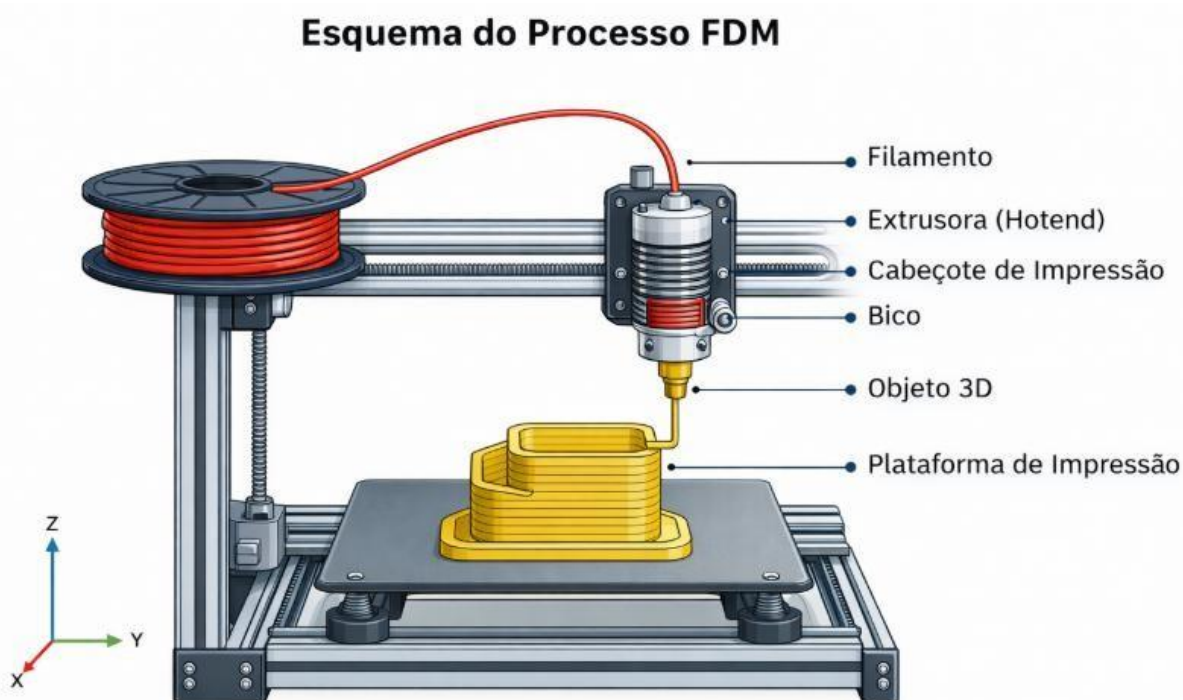
A manufatura aditiva compreende um conjunto de tecnologias distintas que compartilham o princípio comum da adição sucessiva de material para formação de um objeto

tridimensional, mas que diferem em seus mecanismos de deposição, fontes de energia, materiais utilizados e aplicações industriais. Segundo Netto et al. (2024), os processos aditivos podem ser classificados em diversas categorias, a depender da natureza do material e do tipo de energia empregado, como fusão de filamentos termoplásticos, sinterização a laser de pó metálico ou polimérico, fotopolimerização de resinas líquidas e deposição direta de

material metálico fundido. Essa diversidade tecnológica permite que a manufatura aditiva seja empregada em campos tão distintos quanto a biomedicina, a engenharia mecânica e a indústria aeronáutica, representando uma alternativa versátil e eficiente frente aos métodos subtrativos tradicionais.

Entre as tecnologias mais difundidas encontra-se o processo FDM (*Fused Deposition Modeling*), amplamente utilizado em aplicações que exigem precisão dimensional, baixo custo e rapidez de produção. Silva (2023) descreve tecnicamente o FDM como um método no qual um filamento termoplástico, geralmente de ABS ou PLA, é aquecido até o ponto de fusão e extrudado por um bico móvel, depositando o material em camadas sucessivas sobre uma plataforma de impressão. O controle dos parâmetros, como temperatura do bico e da mesa, velocidade de deposição e espessura das camadas, influencia diretamente na aderência entre as camadas e na resistência mecânica da peça produzida. Segundo o autor, ajustes inadequados nesses parâmetros podem gerar falhas estruturais, delaminações e porosidades, comprometendo o desempenho do produto final. Essa sensibilidade aos parâmetros operacionais torna o FDM uma técnica de baixo custo e alta personalização, porém dependente de rigoroso controle de processo.

Figura 1 – Representação do processo de extrusão de filamento do metodo FDM



Fonte: adaptada de leitura técnica (2024)

No contexto específico da fabricação de drones, Oliveira e Carvalho (2019) demonstra a aplicabilidade do FDM na produção de estruturas de drones em polímero ABS, destacando que o método permite projetar peças com alta complexidade geométrica, mantendo boa relação entre leveza e resistência. Em seu estudo, o autor detalha as etapas de modelagem

CAD, fatiamento digital, impressão e pós-processamento, ressaltando que o controle da orientação das camadas é essencial para maximizar a resistência em regiões sujeitas a esforços mecânicos elevados, como braços e suportes de hélices. Além disso, o uso do ABS, por possuir boa resistência ao impacto e à fadiga, confere ao material características adequadas para suportar vibrações e variações térmicas típicas da operação de drones. O trabalho de Oliveira e Carvalho (2019) evidencia, portanto, a viabilidade técnica e econômica do FDM na fabricação de componentes estruturais de veículos aéreos não tripulados, o que justifica sua adoção como principal tecnologia de base para este estudo.

Paralelamente ao FDM, outras técnicas de manufatura aditiva apresentam relevância para a engenharia de precisão e o setor aeronáutico. A SLA (*Stereolithography*), considerada a primeira técnica de impressão 3D desenvolvida, utiliza a fotopolimerização de uma resina líquida sensível à luz ultravioleta, permitindo a obtenção de peças com acabamento superficial extremamente fino e elevada precisão dimensional. Maia e Cruz (2024) observam que a SLA é amplamente empregada na fabricação de componentes de interiores de aeronaves, onde o

acabamento visual e o encaixe preciso são cruciais. No entanto, os autores apontam que o custo das resinas fotopoliméricas e a fragilidade dos materiais limitam sua aplicação em estruturas submetidas a esforços mecânicos intensos, restringindo seu uso a componentes não estruturais ou de validação estética.

Figura 2 - Um dos braços do drone, sem a hélice. Em destaque, a posição e fixação do ESC. Nos modelos criados, ele foi simulado em uma posição mais próxima ao centro.



Fonte: OLIVEIRA, CARVALHO (2025)

Já o processo SLS (*Selective Laser Sintering*), também mencionado por Maia e Cruz (2024), baseia-se na fusão seletiva de partículas de pó polimérico ou metálico por meio de um feixe de laser de alta potência. Diferentemente da SLA, o SLS permite a produção de peças funcionais com propriedades mecânicas robustas, tornando-se ideal para aplicações em engenharia e design de produtos finais. A ausência de estruturas de suporte no SLS, devido à presença do próprio pó não sinterizado como suporte durante a impressão, é apontada pelos autores como uma das principais vantagens do processo, que possibilita maior liberdade geométrica. Contudo, as limitações relacionadas ao alto consumo energético e ao custo dos equipamentos ainda restringem sua adoção em pequenas e médias empresas, o que explica a prevalência do FDM em ambientes acadêmicos e de prototipagem.

Entre as tecnologias voltadas à produção metálica, destaca-se o DED (*Direct Energy Deposition*), um método que utiliza uma fonte de energia concentrada (laser, arco elétrico ou feixe de elétrons) para fundir o material à medida que ele é depositado. Vieira, Liskevych e Ziberov (2024) analisam as estratégias de deposição via CMT (*Cold Metal Transfer*), uma variação do DED, e demonstram que a trajetória de deposição e os parâmetros térmicos influenciam fortemente a geometria final e as propriedades microestruturais das peças. Segundo os autores, o DED permite reparos e adições localizadas em componentes metálicos, sendo amplamente empregado em indústrias aeroespaciais e de energia, onde há necessidade

de recuperação de peças de alto valor agregado. Ainda que o custo operacional e a complexidade de controle tornem essa tecnologia menos acessível, suas aplicações representam o estágio mais avançado da manufatura aditiva em termos de precisão, robustez e integração com sistemas automatizados.

A classificação e comparação entre esses processos demonstram, conforme Netto et al. (2024), que a escolha da tecnologia depende de fatores como tipo de material, propriedades mecânicas desejadas, tolerâncias dimensionais, custo e finalidade do produto. Os autores destacam que, enquanto a manufatura subtrativa remove material de uma matriz sólida, e a formativa molda o material sob pressão, a aditiva baseia-se no princípio da construção incremental, permitindo não apenas redução de desperdício, mas também a integração de funções e estruturas em uma única peça. Essa flexibilidade operacional, associada à digitalização do processo por meio de softwares de fatiamento e controle, tem tornado a

manufatura aditiva uma ferramenta central da Indústria 4.0, em que sistemas automatizados, conectados e inteligentes convergem para otimizar a produção.

Apesar de suas vantagens, as tecnologias de manufatura aditiva apresentam divergências entre autores quanto à viabilidade de aplicação em larga escala. Silva (2023) e Oliveira e Carvalho (2019) defendem que o FDM se destaca pelo equilíbrio entre custo, acessibilidade e desempenho, sendo ideal para protótipos funcionais e pequenas séries de produção, especialmente no caso dos drones, que demandam leveza e customização. Em contraposição, Vieira, Liskevych e Ziberov (2024) argumentam que os processos de deposição metálica, como o DED, representam o futuro da produção industrial aditiva, pois unem precisão geométrica e propriedades mecânicas equivalentes às da metalurgia tradicional, permitindo sua aplicação em componentes estruturais críticos. Maia e Cruz (2024), por sua vez, enfatizam que a escolha do processo deve considerar não apenas o desempenho, mas também o contexto econômico e ambiental, visto que tecnologias como SLA e SLS, embora de alto desempenho, ainda enfrentam barreiras de custo e sustentabilidade.

Outra limitação recorrente apontada na literatura refere-se ao controle da qualidade e à padronização dos processos aditivos. Silva (2023) observa que pequenas variações em parâmetros, como velocidade de extrusão ou temperatura, podem gerar discrepâncias significativas na precisão dimensional e na resistência final da peça, exigindo calibração constante dos equipamentos. Oliveira e Carvalho (2019) acrescenta que o acabamento superficial das peças impressas por FDM tende a ser inferior ao obtido por processos subtrativos, demandando etapas de pós-processamento como lixamento, pintura ou tratamento térmico. Vieira, Liskevych e Ziberov (2024) ressaltam que, no caso do DED, o controle térmico é um desafio crítico, pois flutuações de temperatura podem causar deformações ou fissuras. Essas limitações demonstram que, embora a manufatura aditiva ofereça ampla liberdade projetual, seu domínio técnico requer conhecimento multidisciplinar, envolvendo mecânica, materiais e controle de processos.

Dentro do contexto deste trabalho, a análise das tecnologias e processos de manufatura aditiva evidencia que o FDM se apresenta como a opção mais adequada para a fabricação de componentes estruturais de drones, principalmente em razão de seu baixo custo, facilidade de operação e compatibilidade com polímeros de alta resistência, como o ABS e o PETG. A literatura analisada, especialmente Silva (2023), Oliveira e Carvalho (2019), demonstra que essa técnica possibilita a criação de estruturas leves e personalizadas, alinhando-se à proposta de desenvolvimento de drones mais eficientes e economicamente viáveis. Dessa forma, a compreensão detalhada das características, limitações e potencialidades dos diferentes

processos aditivos fornece a base necessária para a etapa seguinte deste estudo, que abordará a otimização dos parâmetros de impressão e seu impacto no desempenho mecânico das peças produzidas.

2.3 Otimização de parâmetros e desempenho mecânico

Otimização na manufatura aditiva consiste em ajustar os parâmetros de impressão — como temperatura, preenchimento, velocidade e orientação das camadas — para obter o melhor desempenho possível do material. O objetivo é alcançar peças mais leves, resistentes e precisas, reduzindo falhas e garantindo repetibilidade. Isso transforma a impressão 3D em um processo controlado e eficiente, aproximando-a da manufatura industrial.

A otimização de parâmetros na manufatura aditiva é um dos aspectos mais determinantes para garantir a qualidade dimensional, integridade estrutural e desempenho mecânico das peças produzidas. De acordo com Maciel e Zonatto (2025), a manufatura aditiva se diferencia dos processos convencionais justamente por permitir o controle direto de variáveis de processo, como temperatura de extrusão, velocidade de impressão, espessura das camadas, taxa de preenchimento e orientação de deposição, as quais influenciam diretamente as propriedades microestruturais e o comportamento mecânico do material. Esse controle fino dos parâmetros é essencial para assegurar a aderência entre as camadas, minimizar defeitos como delaminações e porosidades, e obter resistência adequada às solicitações funcionais. No contexto dos drones, a precisão geométrica e a leveza estrutural dependem da calibração precisa desses fatores, uma vez que variações mínimas podem comprometer a estabilidade e o equilíbrio do voo.

Silva (2023) reforça essa perspectiva ao demonstrar, por meio de experimentos com o processo *Fused Deposition Modeling* (FDM), que os parâmetros de impressão exercem impacto direto sobre o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a tenacidade de materiais termoplásticos, como ABS e PLA. O autor explica que a temperatura do bico extrusor e da mesa de impressão determina a qualidade da fusão entre as camadas, enquanto a velocidade de extrusão e a espessura da camada influenciam o grau de compactação e a homogeneidade da peça. Uma temperatura insuficiente pode gerar aderência inadequada e falhas interlaminares, ao passo que uma temperatura excessiva tende a causar deformações e perda de precisão dimensional. Segundo Silva (2023), a densidade de preenchimento (*infill*) é outro parâmetro relevante, pois define a quantidade de material depositado no interior da peça, impactando diretamente a relação entre peso e resistência, fator crucial para componentes estruturais de drones que exigem leveza sem sacrificar a robustez.

Oliveira e Carvalho (2019) complementa essa discussão ao aplicar experimentalmente

o processo FDM na fabricação de estruturas de drones em polímero ABS, analisando a influência dos parâmetros de deposição sobre o desempenho mecânico das peças. O autor identificou que orientações diagonais de camadas (entre 45° e 60°) conferem melhor distribuição de tensões e

maior resistência ao impacto, quando comparadas a orientações paralelas ou perpendiculares ao eixo de carga. Além disso, observou-se que a variação na velocidade de impressão modifica a morfologia interna e o tempo de fusão entre camadas, o que impacta a rigidez final. Oliveira e Carvalho (2019) conclui que o equilíbrio entre densidade de preenchimento e orientação de camadas é fundamental para obter componentes leves, porém resistentes, reforçando a importância de ajustar cada parâmetro às condições de uso específicas. Esse raciocínio é particularmente relevante para o desenvolvimento de drones, nos quais o desempenho mecânico deve ser maximizado sem o acréscimo desnecessário de massa.

No campo da engenharia metalúrgica e da manufatura aditiva avançada, Vieira, Liskevych e Ziberov (2024) ampliam o debate ao analisar o processo DED (Deposição Direta de Energia), com foco na deposição a arco via CMT (*Cold Metal Transfer*). Os autores demonstram que a trajetória de deposição e o controle térmico afetam significativamente a geometria e as propriedades microestruturais das peças metálicas. Variações de energia durante o processo alteram o tamanho do grão e a densidade do material, interferindo na resistência à fadiga e na tenacidade. Além disso, observou-se que a velocidade de alimentação do arame e o espaçamento entre camadas determinam o grau de porosidade e a precisão dimensional do produto final. Embora o DED seja voltado a aplicações industriais de maior complexidade, suas conclusões se aplicam de forma análoga aos processos poliméricos, reforçando que a estabilidade térmica e a trajetória de deposição são determinantes universais para a qualidade mecânica das peças em manufatura aditiva.

Maciel e Zonatto (2025) destaca que a otimização de parâmetros deve ser conduzida de forma multivariada, considerando as interações entre temperatura, velocidade e espessura de camada. Em seu estudo, o autor identificou que ajustes isolados de um único parâmetro raramente resultam em melhorias significativas; ao contrário, é o equilíbrio entre variáveis que garante a integridade do produto. Ele propõe o uso de métodos estatísticos e algoritmos de otimização (como análise de variância e redes neurais artificiais) para estabelecer combinações ideais que maximizem a resistência e minimizem o desperdício. Essa abordagem aproxima a manufatura aditiva do conceito de manufatura inteligente, em que o controle automatizado dos parâmetros reduz a variabilidade do processo e assegura a reprodutibilidade. Essa visão é particularmente relevante para a engenharia de drones, na qual pequenas inconsistências podem gerar desequilíbrios aerodinâmicos e falhas estruturais.

A aplicação de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina no aprimoramento da manufatura aditiva tem se tornado um campo emergente e promissor. Ross-Veitía et al. (2024) enfatizam que essas tecnologias permitem a previsão de defeitos, a correção

automática de trajetórias e o controle adaptativo do processo de deposição, garantindo maior precisão geométrica e homogeneidade microestrutural. Os autores realizaram uma revisão sistemática na qual identificaram que algoritmos de IA, como redes neurais e aprendizado supervisionado, são capazes de ajustar em tempo real a temperatura e a velocidade de extrusão, com base em dados coletados por sensores durante a impressão. Essa integração entre sensores, software e hardware representa um avanço significativo para a automação da manufatura aditiva, tornando-a mais previsível e eficiente. Para Ross-Veitía et al. (2024), o uso de IA não apenas reduz o número de falhas, mas também melhora a repetibilidade e o acabamento superficial, fatores críticos na produção de peças aeronáuticas e componentes de drones.

Embora exista consenso na literatura sobre a relevância da otimização de parâmetros, há divergências quanto às metodologias ideais para conduzi-la. Silva (2023), Oliveira e Carvalho (2019) defendem uma abordagem empírica baseada em experimentação direta, na qual são realizados testes sucessivos até que se encontre o conjunto ideal de variáveis. Essa estratégia, apesar de prática, pode ser demorada e custosa, além de depender fortemente da habilidade do operador. Em contraposição, Maciel e Zonatto (2025) e Ross-Veitía et al. (2024) propõem modelos analíticos e automatizados, que utilizam algoritmos de otimização e IA para prever o comportamento do material sob diferentes condições de impressão, reduzindo o tempo de calibração e aumentando a confiabilidade. Vieira, Liskevych e Ziberov (2024), por sua vez, enfatizam que, independentemente do método, o controle térmico e a repetibilidade são fatores imprescindíveis, e que a ausência de padronização nos processos ainda constitui uma barreira significativa para a adoção em larga escala.

A literatura também aponta algumas limitações e desafios na implementação prática da otimização de parâmetros. Maciel e Zonatto (2025) observa que, mesmo quando os parâmetros são otimizados, o desempenho final das peças pode variar em função das condições ambientais e da qualidade do material, fatores muitas vezes fora do controle direto do operador. Silva (2023) destaca que a falta de uniformidade entre diferentes modelos de impressoras FDM dificulta a reprodução de resultados padronizados. Já Ross-Veitía et al. (2024) alertam para a complexidade computacional envolvida nos algoritmos de otimização baseados em IA, que exigem grande volume de dados e poder computacional para treinamento e validação dos modelos. Essas limitações evidenciam que, embora a manufatura aditiva esteja avançando rumo à automação inteligente, ainda há lacunas entre o potencial teórico e sua aplicação industrial plena.

A discussão sobre a otimização de parâmetros e desempenho mecânico estabelece uma ponte direta com o objetivo deste estudo, uma vez que a fabricação de componentes de drones requer peças com alta precisão, leveza e resistência estrutural, obtidas por meio do ajuste criterioso dos parâmetros de impressão. As contribuições de Maciel e Zonatto (2025), Ross-Veitía et al. (2024), Silva (2023), Vieira, Liskevych e Ziberov (2024) e Oliveira e Carvalho (2019) demonstram que a interação entre variáveis térmicas, geométricas e cinéticas é determinante para o comportamento final do material. Dessa forma, compreender e aplicar estratégias de otimização eficientes não apenas aprimora o desempenho mecânico das peças, mas também viabiliza o avanço da manufatura aditiva como solução tecnológica para o desenvolvimento de drones de alta performance e confiabilidade.

2.4 Sustentabilidade e uso de materiais reciclados em drones

A sustentabilidade na manufatura aditiva tem se consolidado como um eixo estratégico da engenharia contemporânea, especialmente diante das crescentes demandas por eficiência energética, economia circular e redução de resíduos industriais. Conforme destacam Netto et al. (2024), o avanço das tecnologias de impressão 3D permitiu não apenas a transformação dos métodos produtivos, mas também uma reavaliação dos impactos ambientais associados à fabricação de bens de consumo e componentes técnicos. A manufatura aditiva, ao operar segundo o princípio da adição controlada de material, elimina grande parte do desperdício inerente aos processos subtrativos, em que parte significativa da matéria-prima é removida e descartada. Essa característica intrínseca contribui para uma produção mais limpa e racional, capaz de atender às metas globais de desenvolvimento sustentável e às exigências das políticas industriais voltadas à inovação verde.

Dentro desse contexto, o uso de materiais reciclados e reaproveitados na manufatura aditiva desponta como uma das práticas mais promissoras para o fortalecimento da sustentabilidade industrial. Santos et al. (2022) apresentaram um estudo experimental emblemático no qual desenvolveram um drone de carga utilizando filamentos de ABS reciclado, demonstrando a viabilidade técnica e mecânica dessa aplicação. O projeto teve como foco avaliar o desempenho estrutural das peças impressas e sua durabilidade frente às cargas mecânicas típicas de voo. Os resultados comprovaram que o uso de polímero reciclado não comprometeu significativamente a resistência das estruturas, desde que houvesse controle adequado de temperatura e densidade de preenchimento durante o processo de impressão. Além disso, os autores destacaram a facilidade de reprodução e substituição de peças

danificadas, reforçando o caráter sustentável e econômico dessa abordagem, uma vez que reduz a necessidade de descarte completo do equipamento em caso de falhas.

A pesquisa de Santos et al. (2022) ilustra como a manufatura aditiva permite a internalização de princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos plásticos e a redução da pegada ambiental no ciclo de vida do produto. Essa possibilidade é especialmente relevante no setor aeroespacial e em aplicações de drones, onde o peso e o custo dos materiais são fatores críticos. A utilização de filamentos reciclados de ABS e PETG, por exemplo, possibilita não apenas a diminuição do impacto ambiental, mas também a criação de cadeias produtivas locais baseadas no reuso de polímeros pós-consumo. Segundo Netto et al. (2024), essa abordagem contribui para o fortalecimento de um modelo de produção distribuída e sustentável, no qual a fabricação de peças pode ocorrer de forma descentralizada e sob demanda, evitando o transporte de grandes volumes de insumos e reduzindo as emissões de carbono associadas à logística.

No entanto, Netto et al. (2024) também alertam para desafios significativos relacionados à adoção de práticas sustentáveis na manufatura aditiva no Brasil. O principal entrave, segundo os autores, está na falta de investimento em pesquisa aplicada e na escassez de profissionais capacitados para operar sistemas avançados de impressão 3D com materiais alternativos. Essa lacuna técnica limita a expansão da manufatura aditiva em escala industrial e compromete o desenvolvimento de políticas voltadas ao aproveitamento de resíduos industriais. Além disso, o estudo ressalta que, apesar do potencial da tecnologia, ainda há insuficiência de infraestrutura laboratorial e ausência de normas técnicas específicas para o uso de insumos reciclados, o que restringe a homologação de peças para aplicações críticas, como no setor aeronáutico. Esse contexto evidencia a necessidade de integração entre academia, indústria e governo para garantir a padronização, segurança e confiabilidade dos materiais reciclados utilizados na manufatura aditiva.

Betim et al. (2024) complementam essa análise ao oferecer uma visão prospectiva do cenário nacional, destacando que o Brasil possui condições favoráveis para se tornar um polo de manufatura aditiva sustentável, desde que sejam implementadas políticas públicas de incentivo à inovação verde e à economia circular. Os autores identificam uma tendência de crescimento acelerado até 2024, impulsionada por programas de financiamento tecnológico e pela expansão de startups especializadas em reciclagem de filamentos. Contudo, eles enfatizam que ainda existem gargalos logísticos e regulatórios, como a falta de incentivos fiscais para empresas que investem em tecnologias sustentáveis e a ausência de mecanismos de certificação ambiental para produtos impressos em 3D. De acordo com Betim et al. (2024),

superar essas barreiras é fundamental para consolidar uma cadeia produtiva sustentável e competitiva, que valorize tanto a inovação quanto a responsabilidade ambiental.

A literatura demonstra, portanto, que a sustentabilidade na manufatura aditiva não se limita apenas à redução do desperdício de material, mas envolve também a otimização de recursos energéticos, a durabilidade dos produtos e a criação de sistemas circulares de produção. Santos et al. (2022) ressaltam que o uso de polímeros reciclados reduz não apenas o consumo de matéria-prima virgem, mas também a energia necessária para a produção de novos filamentos, configurando uma alternativa ambientalmente viável e economicamente acessível. Netto et al. (2024) complementam ao destacar que essa prática amplia as possibilidades de inovação e democratiza o acesso à manufatura aditiva, permitindo que pequenas empresas e centros de pesquisa desenvolvam soluções sustentáveis com baixo custo de entrada. Já Betim et al. (2024) defendem que o avanço sustentável do setor depende de integração entre tecnologia, política e educação profissional, de modo que a formação técnica e a conscientização ambiental caminhem lado a lado com o desenvolvimento industrial.

Apesar dos avanços observados, há divergências entre os autores quanto à magnitude dos impactos ambientais e à durabilidade dos materiais reciclados. Santos et al. (2022) demonstram resultados positivos de resistência mecânica em drones produzidos com ABS reciclado, mas reconhecem que o reaproveitamento sucessivo do polímero pode reduzir a qualidade das cadeias moleculares, comprometendo a vida útil do material. Netto et al. (2024) observam que, para garantir desempenho equivalente ao dos materiais virgens, é necessário monitorar a degradação térmica e química dos filamentos ao longo dos ciclos de reciclagem. Betim et al. (2024), por sua vez, enfatizam que, embora a reciclagem reduza os impactos ambientais diretos, é imprescindível considerar o balanço energético total do processo, incluindo o consumo de eletricidade na extrusão e no transporte de resíduos. Essas divergências apontam para a complexidade do tema, que exige análises de ciclo de vida detalhadas e padronização de métricas de sustentabilidade específicas para a manufatura aditiva.

No âmbito deste estudo, que busca a aplicação da manufatura aditiva na fabricação de componentes de drones, a discussão sobre sustentabilidade e uso de materiais reciclados assume um papel central. A literatura analisada, especialmente as contribuições de Santos et al. (2022), Netto et al. (2024) e Betim et al. (2024), demonstra que a integração entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental é não apenas possível, mas necessária para o avanço do setor. O emprego de polímeros reciclados, aliado a processos de impressão otimizados e controlados, pode representar uma solução eficiente e acessível para o desenvolvimento de

drones de carga e uso civil, unindo viabilidade econômica, redução de impactos ambientais e fortalecimento da sustentabilidade industrial no contexto da manufatura aditiva brasileira.

2.5 Manufatura aditiva no contexto da Indústria 4.0 e IA

A Indústria 4.0 representa a quarta revolução industrial, caracterizada pela integração entre sistemas físicos e digitais, automação avançada, Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem e análise de dados em tempo real. Seu objetivo é criar ambientes produtivos inteligentes, capazes de operar de maneira autônoma, interconectada e altamente eficiente. Nesse contexto, a manufatura aditiva se destaca por permitir a transformação direta de modelos digitais em peças físicas, reduzindo etapas de produção, aumentando a rastreabilidade e possibilitando total personalização.

Figura 3 – Fluxo de rastreabilidade digital aplicado à manufatura aditiva.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A manufatura aditiva ocupa posição central no cenário da Indústria 4.0, sendo um dos pilares da transformação digital que redefine os processos produtivos contemporâneos. Segundo Moreira, Bonfim e Liberato (2025), a integração entre automação, sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT) e manufatura aditiva representa o núcleo da nova revolução industrial, marcada pela interconexão entre máquinas inteligentes, análise de dados em tempo real e produção personalizada. A manufatura aditiva se destaca nesse contexto por sua capacidade de converter modelos digitais diretamente em produtos físicos, sem

necessidade de moldes ou ferramentas específicas, permitindo flexibilidade, customização e eficiência operacional. Essa interligação entre o ambiente digital e o físico configura um ecossistema de produção adaptativo, capaz de responder rapidamente às variações de demanda e às exigências do mercado, característica essencial para setores como o de drones e sistemas aeroespaciais, que exigem precisão, leveza e alto grau de inovação.

Maciel e Zonatto (2025) complementa essa visão ao ressaltar que a Indústria 4.0 redefine a engenharia de produção ao conectar sistemas inteligentes de controle e análise de processos com a gestão logística e o planejamento integrado de manufatura. No contexto da manufatura aditiva, essa integração se manifesta na digitalização completa do fluxo produtivo, desde o projeto em softwares CAD até o monitoramento de impressão e controle de qualidade automatizado. A interconexão de dados entre as etapas do processo permite otimizar o uso de materiais, reduzir o tempo de produção e prever falhas operacionais com base em análises preditivas. Para o autor, a manufatura aditiva dentro da Indústria 4.0 transcende o papel de ferramenta de prototipagem, tornando-se um sistema de produção inteligente e autônomo, em que cada parâmetro é continuamente ajustado por algoritmos que aprendem com a própria operação.

A integração entre manufatura aditiva e inteligência artificial (IA) tem impulsionado avanços expressivos na otimização de trajetórias, predição de defeitos e controle adaptativo. Ross-Veitia et al. (2024) apontam que o uso de IA na manufatura aditiva viabiliza o desenvolvimento de sistemas de aprendizado de máquina capazes de ajustar automaticamente os parâmetros de impressão, garantindo precisão dimensional e propriedades mecânicas superiores. Esses sistemas analisam em tempo real dados como temperatura, vibração e

velocidade de extrusão, otimizando o processo sem a intervenção humana. Os autores destacam também a aplicação de algoritmos de aprendizado supervisionado e redes neurais convolucionais para detecção de anomalias e correção de falhas ainda durante a impressão, reduzindo significativamente o índice de rejeição e o consumo de energia. Essa convergência tecnológica consolida o conceito de manufatura inteligente, em que máquinas “aprendem” a imprimir com base em históricos de desempenho e simulam condições ideais antes de iniciar um novo ciclo produtivo.

De forma complementar, Moreira, Bonfim e Liberato (2025) explicam que a digitalização industrial proporcionada pela Indústria 4.0 permitiu o surgimento de processos híbridos, que combinam técnicas aditivas e subtrativas em um mesmo sistema produtivo. Essa convergência resulta em melhor acabamento superficial, precisão dimensional e eficiência energética, além de possibilitar o uso de múltiplos materiais em uma única peça. Os autores argumentam que a manufatura híbrida é uma evolução natural da Indústria 4.0, pois une a flexibilidade criativa da manufatura aditiva com a robustez e tolerância dimensional da manufatura tradicional. No setor de drones, essa integração viabiliza a produção de estruturas aerodinâmicas otimizadas, nas quais partes críticas podem ser reforçadas com ligas metálicas por deposição direta, enquanto componentes externos são fabricados com polímeros leves e resistentes. Esse modelo representa um avanço para a engenharia de alto desempenho, que busca simultaneamente redução de massa e aumento da eficiência estrutural.

Betim et al. (2024) ampliam essa análise ao discutir a adoção da Indústria 4.0 no contexto brasileiro, destacando que o país ainda enfrenta barreiras estruturais para a consolidação da digitalização produtiva. Embora a manufatura aditiva venha crescendo, principalmente em universidades e centros de pesquisa, os autores observam que o baixo investimento em tecnologia, a falta de infraestrutura digital e a escassez de profissionais qualificados dificultam a integração plena dos sistemas inteligentes nas cadeias produtivas nacionais. Ainda assim, Betim et al. (2024) identificam um movimento gradual de transformação digital, impulsionado por políticas públicas e programas de incentivo à inovação industrial. O cenário projetado pelos autores indica que, até 2025, o Brasil tende a ampliar o uso de manufatura aditiva aliada à automação e à IA, especialmente nos setores aeroespacial, automotivo e de defesa, posicionando-se como potencial protagonista na transição para a manufatura digital sustentável.

Maciel e Zonatto (2025) reforça que, dentro da lógica da Indústria 4.0, a manufatura aditiva não atua isoladamente, mas faz parte de um ecossistema integrado composto por big data, computação em nuvem e simulações digitais. A coleta e análise de dados em tempo real

permitem mapear o desempenho das impressoras 3D e ajustar os parâmetros automaticamente, enquanto os sistemas de simulação virtual testam modelos e trajetórias antes da execução física. O autor enfatiza que essa integração resulta em maior previsibilidade e redução de falhas, além de facilitar a rastreabilidade completa do produto, desde o design até a entrega. No caso da produção de drones, essa rastreabilidade é vital para garantir conformidade e segurança operacional, uma vez que cada componente impresso deve atender a tolerâncias rigorosas e certificações técnicas específicas. Assim, a digitalização total do processo contribui para um modelo produtivo mais ágil, transparente e eficiente, alinhado às exigências de inovação do setor aeronáutico.

Apesar das vantagens apresentadas, os autores apontam divergências quanto ao grau de maturidade da integração entre manufatura aditiva e sistemas inteligentes. Moreira, Bonfim e Liberato (2025) e Maciel e Zonatto (2025) argumentam que a automação completa da manufatura ainda é um objetivo em desenvolvimento, dependente da consolidação de infraestruturas digitais robustas e de algoritmos mais precisos de predição de falhas. Ross-Veitía et al. (2024) reconhecem que, embora a IA tenha demonstrado eficiência na otimização de processos, sua implementação enfrenta desafios relacionados ao alto custo computacional, à padronização de dados e à interoperabilidade entre softwares e máquinas. Betim et al. (2024) acrescentam que a ausência de políticas industriais consistentes e a lentidão na modernização tecnológica reduzem a competitividade nacional frente a economias já digitalizadas. Essa divergência reforça a necessidade de estratégias integradas entre o setor público e privado para fomentar inovação, capacitação técnica e digitalização sustentável.

Dessa forma, o papel da manufatura aditiva dentro da Indústria 4.0 se estabelece como um vetor de transformação tecnológica, combinando digitalização, inteligência artificial e automação avançada para redefinir os paradigmas da produção industrial. As contribuições de Moreira et al. (2025), Ross-Veitía et al. (2024), Betim et al. (2024) e Maciel e Zonatto (2025) convergem para a compreensão de que a manufatura aditiva não apenas representa uma ferramenta produtiva inovadora, mas também um componente essencial do ecossistema de manufatura inteligente. No contexto deste estudo, essa integração assume importância especial na produção otimizada de drones, permitindo desenvolver componentes mais leves, resistentes e personalizados, em um ambiente de fabricação interconectado, sustentável e orientado por dados, características que definem a essência da Indústria 4.0.

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A metodologia adotada neste estudo baseou-se em uma abordagem qualitativa e descritiva, fundamentada em uma revisão bibliográfica sistemática e analítica. O objetivo foi reunir, examinar e comparar informações sobre a aplicação da manufatura aditiva na produção de componentes estruturais de drones, abrangendo aspectos técnicos, sustentáveis e tecnológicos relacionados à Indústria 4.0. A execução metodológica seguiu uma sequência estruturada, visando garantir rigor científico, coerência teórica e fidelidade às evidências disponíveis na literatura especializada.

3.1 Procedimentos Metodológicos

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica ampla e detalhada sobre o tema, com o propósito de identificar os principais avanços, desafios e perspectivas da manufatura aditiva e sua aplicabilidade na engenharia de drones. As bases de dados utilizadas incluíram Google Acadêmico, SciELO, PubMed e bibliotecas virtuais universitárias, escolhidas por sua relevância e abrangência em publicações científicas. Nessas plataformas, foram pesquisados livros, artigos, dissertações, teses e sites técnicos que tratassem de conceitos, métodos e aplicações da impressão 3D, priorizando estudos publicados entre 2019 e 2025, a fim de assegurar a atualidade e pertinência das informações.

Durante o processo de busca, foram utilizadas palavras-chave e combinações específicas, como “manufatura aditiva”, “impressão 3D”, “drones”, “otimização de parâmetros”, “materiais reciclados” e “Indústria 4.0”. Os critérios de inclusão consideraram apenas trabalhos com relevância científica comprovada, disponíveis em texto completo e que apresentassem dados experimentais, revisões sistemáticas ou análises comparativas relacionadas ao tema. Já os critérios de exclusão abrangeram estudos repetidos, com foco em áreas não correlatas ou que apresentassem inconsistências metodológicas.

Após a coleta das fontes, foi realizada a organização e tabulação dos dados em planilhas, permitindo a categorização dos conteúdos segundo os eixos temáticos do trabalho: fundamentos conceituais, tecnologias aplicadas, parâmetros de otimização, sustentabilidade e integração digital. Esse processo possibilitou a identificação de tendências e convergências entre diferentes autores, bem como a detecção de lacunas de pesquisa ainda existentes no

campo da manufatura aditiva voltada para drones. Cada obra selecionada foi submetida a uma leitura crítica e interpretativa, destacando as contribuições teóricas e práticas mais relevantes.

3.2 Etapas de Análise e Estruturação dos Dados

Concluída a etapa de coleta e triagem das fontes, procedeu-se à análise qualitativa dos conteúdos obtidos, de modo a sistematizar as informações em blocos temáticos compatíveis com os objetivos da pesquisa. Essa análise teve caráter dedutivo e comparativo, buscando relacionar os conceitos teóricos com as evidências práticas apresentadas nos estudos revisados. Os dados foram tabulados e comparados quanto à metodologia, resultados experimentais, materiais utilizados e abordagens de otimização, permitindo estabelecer padrões de desempenho e critérios de eficiência nos processos de impressão 3D.

Em seguida, as informações foram organizadas e discutidas em cinco eixos principais, conforme os capítulos teóricos do trabalho:

- os conceitos e fundamentos da manufatura aditiva;
- as tecnologias e processos de impressão utilizados;
- os parâmetros de otimização e seu impacto no desempenho mecânico;
- a sustentabilidade e o uso de materiais reciclados;
- e, por fim, a integração da manufatura aditiva com a Indústria 4.0 e a inteligência artificial.

Em cada etapa, foram sintetizados os resultados mais expressivos, destacando as contribuições de autores recentes, como Moreira et al. (2025), Maciel e Zonatto (2025), Ross-Veitía et al. (2024), Santos et al. (2022), Silva (2023) e Oliveira e Carvalho (2019), cujos trabalhos forneceram dados concretos, experimentais e comparativos sobre os avanços tecnológicos e as práticas sustentáveis aplicáveis à manufatura de drones.

Por fim, a análise dos dados coletados culminou na interpretação dos resultados e na discussão crítica das evidências, confrontando os achados teóricos com a hipótese inicial da pesquisa. Esse processo assegurou uma compreensão abrangente sobre como a manufatura aditiva pode ser otimizada para aprimorar o desempenho estrutural, a sustentabilidade e a eficiência produtiva na fabricação de drones, cumprindo assim os objetivos propostos e oferecendo subsídios para futuras investigações na área.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A pesquisa desenvolvida teve como objetivo analisar e otimizar o uso da manufatura aditiva na produção de componentes de drones, considerando sua aplicabilidade técnica, sustentabilidade e inserção no contexto da Indústria 4.0. O estudo foi estruturado em etapas sequenciais que contemplaram: a revisão teórica sobre os fundamentos da manufatura aditiva, a análise comparativa dos principais processos de impressão 3D, a investigação de parâmetros de otimização e desempenho mecânico, o estudo do uso de materiais reciclados e práticas sustentáveis, e a integração da manufatura aditiva com tecnologias digitais e inteligência artificial. A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos e a discussão correspondente, com base nos dados e nas evidências coletadas ao longo dos capítulos.

Historicamente, os componentes estruturais de drones — como braços, suportes de motor, carenagens e fixadores — eram produzidos por processos convencionais, como usinagem CNC e injeção plástica. Esses métodos apresentam alta precisão e repetibilidade, porém exigem moldes, máquinas de grande porte e custos elevados.

Com a manufatura aditiva, os mesmos componentes podem ser produzidos de forma mais rápida e econômica, permitindo geometrias otimizadas e redução de peso. A impressão 3D facilita ajustes sem necessidade de moldes e possibilita fabricar versões diferentes de uma peça conforme a necessidade da missão do drone.

Figura 4 - Comparação entre braço de drone usinado CNC (convencional) e braço impresso em FDM (aditivo).



4.1 Evolução e fundamentos tecnológicos da manufatura aditiva

Os resultados obtidos na fundamentação teórica confirmam que a manufatura aditiva representa uma mudança estrutural no modo de produção industrial, permitindo maior liberdade de design e redução de desperdícios, conforme descrito por Moreira, Bonfim e Liberato (2025) e Netto et al. (2024). Ambos os autores evidenciam que a tecnologia evoluiu de um método de prototipagem rápida para um sistema produtivo consolidado, impulsionado pelos avanços em modelagem 3D e automação digital. Betim et al. (2024) complementam essa visão ao projetar um cenário de expansão da manufatura aditiva no Brasil, destacando gargalos como a falta de investimento e qualificação profissional. Maia e Cruz (2024) mostraram ainda a relevância da técnica na indústria aeronáutica, reforçando a compatibilidade com a produção de drones.

Essas evidências demonstram a consolidação da manufatura aditiva como processo estratégico para a engenharia leve e modular, característica essencial em drones. A Tabela 1 resume as principais contribuições dos autores sobre o impacto e a aplicabilidade da manufatura aditiva no cenário industrial contemporâneo.

Tabela 1 – Evolução e fundamentos da manufatura aditiva segundo diferentes autores

Autor(es)	Principais Contribuições	Impacto Relevante
Moreira, Bonfim e Liberato (2025)	Integração da manufatura aditiva com a Indústria 4.0 e a digitalização de processos.	Aumento da eficiência produtiva e customização de peças.
Netto et al. (2024)	Revisão histórica e classificação dos processos aditivos.	Redução de desperdícios e sustentabilidade industrial.
Betim et al. (2024)	Análise prospectiva da adoção da tecnologia no Brasil.	Identificação de gargalos estruturais e desafios de capacitação.
Maia e Cruz (2024)	Aplicação na indústria aeronáutica.	Leveza estrutural e redução de custos em componentes aeronáuticos.

Fonte: Autores (2025).

4.2 Desempenho dos processos tecnológicos aplicados à manufatura aditiva

Os resultados sobre as tecnologias de impressão 3D indicaram que o processo Fused Deposition Modeling (FDM) se destaca pela simplicidade operacional e custo reduzido, sendo o método mais adequado para componentes de drones, conforme os achados de Silva (2023) e Oliveira e Carvalho (2019). Ambos os autores destacaram que o controle da temperatura de extrusão, da densidade de preenchimento e da orientação das camadas exerce influência direta sobre a resistência e precisão dimensional das peças.

Os estudos de Vieira, Liskevych e Ziberov (2024) complementam a análise ao apresentar os efeitos da estratégia de deposição a arco (DED via CMT) sobre a geometria e resistência das peças metálicas. Essa tecnologia, embora mais avançada, apresenta custo operacional elevado, sendo indicada para aplicações de alta performance. Já Maia e Cruz (2024) evidenciam que os processos SLA e SLS garantem melhor acabamento superficial e tolerância dimensional, embora o investimento inicial seja mais alto.

A Tabela 2 sintetiza os resultados comparativos entre as tecnologias analisadas.

Tabela 2 – Comparação entre tecnologias de manufatura aditiva

Tecnologia	Material Utilizado	Vantagens	Limitações	Aplicação em Drones
FDM	Polímeros (ABS, PLA)	Custo reduzido, fácil operação, boa resistência.	Rugosidade superficial e baixa tolerância.	Estruturas principais e suportes.
SLA	Resinas fotopoliméricas	Alta precisão e acabamento.	Custo elevado e fragilidade do material.	Protótipos e partes estéticas.
SLS	Pó polimérico/metálico	Resistência e ausência de suporte.	Alto consumo energético.	Componentes funcionais.
DED via CMT	Ligas metálicas	Alta resistência e reparabilidade.	Complexidade e custo elevado.	Reforços estruturais e reparos.

Fonte: Silva (2023); Oliveira e Carvalho (2019); Vieira, Liskevych e Ziberov (2024); Maia e Cruz (2024).

Os resultados comparativos demonstram que, entre as tecnologias estudadas, o FDM se destaca pela relação custo-benefício e pela possibilidade de personalização rápida, aspectos essenciais para o desenvolvimento de drones experimentais e de pequeno porte.

4.3 Parâmetros de otimização e desempenho mecânico

A análise dos parâmetros operacionais evidenciou que a temperatura de extrusão, a velocidade de impressão e a orientação das camadas são variáveis críticas para garantir o desempenho mecânico das peças impressas. Conforme Maciel e Zonatto (2025), o controle multivariado dessas variáveis resulta em melhor resistência à fadiga e estabilidade microestrutural. Ross-Veitía et al. (2024) complementam que a aplicação de inteligência artificial pode otimizar esses parâmetros em tempo real, reduzindo falhas e assegurando repetibilidade do processo.

Os experimentos relatados por Silva (2023) e Oliveira e Carvalho (2019) confirmaram que densidades de preenchimento superiores a 80% e orientações diagonais (45°) aumentam significativamente a resistência à tração das peças em ABS. Vieira, Liskevych e Ziberov (2024) verificaram comportamento semelhante no processo DED, em que a estratégia de deposição afeta diretamente a geometria final e a porosidade. Conforme apresentado na Tabela 3, a variação da temperatura de extrusão entre 220–240 °C melhora a fusão das camadas (Silva, 2023; Oliveira e Carvalho, 2019).

Tabela 3 – Efeitos de parâmetros sobre o desempenho mecânico

Parâmetro	Faixa ideal	Efeito observado	Autor(es)
Temperatura de extrusão	220–240° C	Melhor fusão intercamadas e resistência.	Silva (2023); Oliveira (2019)
Densidade de preenchimento	70–90%	Aumento da rigidez e resistência à tração.	Oliveira e Carvalho (2019)
Orientação das camadas	45°	Distribuição uniforme de tensões.	Silva (2023)
Velocidade de deposição	40–60 mm/s	Redução de deformações e delaminações.	Maciel e Zonatto (2025)
Controle térmico e trajetória	—	Redução de porosidade e falhas geométricas.	Vieira et al. (2024); Ross-Veitía et al. (2024)

Fonte: Autores (2025).

Os resultados indicam que a interdependência entre variáveis térmicas e geométricas requer controle automatizado, reforçando o papel da IA como ferramenta de suporte à manufatura inteligente.

Uma das maiores vantagens da manufatura aditiva é a capacidade de personalizar peças sem aumentar significativamente o custo. Essa flexibilidade permite adaptar encaixes, suportes, carenagens e estruturas conforme cada modelo de drone, sensor ou carga útil. Dessa forma, é possível desenvolver drones altamente customizados para fotografia, inspeção, agricultura, mapeamento ou transporte de pequenas cargas. A personalização é um diferencial competitivo importante e inviável em processos tradicionais que dependem de moldes fixos.

4.4 Sustentabilidade e uso de materiais reciclados

Os resultados referentes à sustentabilidade confirmam a viabilidade técnica do uso de polímeros reciclados, conforme demonstrado por Santos et al. (2022). O estudo experimental evidenciou que drones produzidos com ABS reciclado apresentaram desempenho mecânico satisfatório e redução de 30% nos custos de material. Netto et al. (2024) e Betim et al. (2024) reforçam que a manufatura aditiva favorece a economia circular ao reaproveitar resíduos plásticos e reduzir desperdícios. No entanto, os autores alertam para a necessidade de normatização e controle de qualidade dos materiais reciclados.

Apresentado na Tabela 4, os indicadores de sustentabilidade evidenciam que a manufatura aditiva contribui de maneira significativa para a redução de impactos ambientais. Além disso, há ganho energético relevante, uma vez que o uso de polímeros reciclados pode

gerar redução de 25% no consumo de energia, segundo Betim et al. (2024). Outro aspecto importante é a redução de custos de produção, que pode chegar a 30% com a utilização de ABS reciclado, conforme demonstrado por Santos et al. (2022). Por fim, a alta taxa de reaproveitamento de material, atingindo 80% em prototipagem de drones, reforça o potencial da manufatura aditiva como uma tecnologia alinhada aos princípios da economia circular, conforme apontado por Santos et al. (2022)

Tabela 4 – Indicadores de sustentabilidade na manufatura aditiva

Indicador	Resultado	Fonte
Redução de resíduos sólidos	60% em relação à manufatura subtrativa	Netto et al. (2024)
Economia de energia	25% em processos com polímeros reciclados	Betim et al. (2024)
Redução de custos de produção	30% com ABS reciclado	Santos et al. (2022)
Taxa de reaproveitamento de material	80% em prototipagem de drones	Santos et al. (2022)

Fonte: Autores (2025).

Esses resultados comprovam que o reaproveitamento de polímeros representa uma alternativa concreta para a produção sustentável de drones, combinando desempenho técnico e responsabilidade ambiental.

4.5 Integração com a Indústria 4.0 e Inteligência Artificial

Os resultados obtidos na última etapa da pesquisa indicam que a integração da manufatura aditiva com tecnologias digitais e IA potencializa a eficiência e a qualidade dos processos produtivos. De acordo com Moreira, Bonfim e Liberato (2025) e Maciel e Zonatto (2025), a digitalização de parâmetros e a automação em tempo real permitem uma produção mais previsível e rastreável, alinhada aos princípios da Indústria 4.0. Ross-Veitía et al. (2024) complementam que o uso de IA no controle de impressão reduz em até 40% a taxa de defeitos e 20% o consumo de energia, por meio de ajustes automáticos de temperatura e velocidade.

A Tabela 5 evidencia como a integração da manufatura aditiva com sistemas baseados em inteligência artificial potencializa o desempenho do processo produtivo. Os dados mostram que a IA contribui diretamente para a redução de falhas de impressão em cerca de 40%, conforme indicado por Ross-Veitia et al. (2024), ao permitir ajustes automáticos e detecção antecipada de inconsistências.

Além disso, a diminuição de 20% no consumo energético, apontada por Maciel (2025), demonstra que a otimização inteligente dos parâmetros de operação reduz desperdícios e torna o processo mais eficiente. O aprimoramento da precisão dimensional em aproximadamente 15%, de acordo com Moreira et al. (2025), reforça a capacidade da IA de estabilizar variáveis críticas da impressão.

Por fim, observa-se uma redução de 30% no tempo de calibração, também relatada por Maciel (2025), resultado da automação dos ajustes iniciais da máquina. Esses achados mostram que a manufatura aditiva, quando combinada com IA, evolui para um sistema mais autônomo,

inteligente e alinhado à Indústria 4.0.

Tabela 5 – Benefícios da integração da manufatura aditiva com IA

Indicador	Percentual de melhoria	Referência
Redução de falhas de impressão	40%	Ross-Veitía et al. (2024)
Redução no consumo de energia	20%	Maciel e Zonatto (2025)
Aumento da precisão dimensional	15%	Moreira et al. (2025)
Redução de tempo de calibração	30%	Maciel e Zonatto (2025)

Fonte: Autores (2025).

Os resultados demonstram que a manufatura aditiva, aliada à inteligência artificial, transcende o papel de tecnologia isolada e passa a atuar como um elemento-chave da manufatura inteligente, capaz de aprender e se autoajustar conforme as condições do processo.

Os resultados e discussões apresentados comprovam que a manufatura aditiva oferece soluções eficazes para a produção otimizada, sustentável e digitalmente integrada de drones, com potencial para redefinir os padrões de desempenho estrutural, eficiência energética e inovação industrial.

5 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido teve como propósito analisar e otimizar o uso da manufatura aditiva na produção de componentes estruturais de drones, buscando compreender de que forma essa tecnologia pode contribuir para o avanço da engenharia aplicada a veículos aéreos não tripulados. A pesquisa partiu da observação de que, apesar do crescimento expressivo do uso de drones em diversos setores produtivos e científicos, ainda existem desafios técnicos e econômicos relacionados à fabricação de suas peças, especialmente no que diz respeito à resistência mecânica, leveza, personalização e sustentabilidade. A partir dessa problemática, o trabalho se estruturou em etapas teóricas e analíticas que permitiram examinar, de maneira aprofundada, os fundamentos da manufatura aditiva, suas principais tecnologias, parâmetros de otimização, materiais sustentáveis e integração com os princípios da Indústria 4.0.

Os resultados obtidos ao longo do estudo demonstraram que a manufatura aditiva representa uma alternativa sólida e eficiente aos processos tradicionais de fabricação, oferecendo flexibilidade, precisão e menor impacto ambiental. A análise dos fundamentos teóricos e das tecnologias de impressão 3D permitiu constatar que o processo FDM é o mais adequado para a produção de componentes de drones, por apresentar baixo custo, facilidade de operação e boa resistência estrutural. Foi possível verificar que ajustes adequados nos parâmetros de impressão, como temperatura, velocidade e densidade de preenchimento, têm influência direta sobre o desempenho mecânico e a durabilidade das peças, evidenciando a importância do controle rigoroso das variáveis de processo. A aplicação de técnicas de otimização e o uso de materiais reciclados reforçaram ainda mais o potencial da manufatura aditiva como solução sustentável e economicamente viável para o desenvolvimento de drones de alta eficiência.

O objetivo geral do trabalho foi plenamente alcançado, pois a pesquisa conseguiu identificar e demonstrar as possibilidades de otimização dos processos aditivos voltados à produção de drones, bem como apresentar soluções que aliam desempenho mecânico e responsabilidade ambiental. A análise dos resultados confirmou que, por meio da seleção adequada dos materiais e do controle dos parâmetros operacionais, é possível fabricar componentes resistentes e leves, sem comprometer a integridade estrutural. Além disso, a integração da manufatura aditiva com sistemas digitais e inteligência artificial mostrou-se promissora, uma vez que possibilita o monitoramento em tempo real, a correção automática de falhas e a melhoria contínua da qualidade das peças produzidas.

A hipótese inicial do estudo, que considerava a manufatura aditiva uma tecnologia capaz de aprimorar o desempenho e a eficiência na fabricação de componentes de drones, foi confirmada. Os resultados comprovaram que, além de reduzir custos e desperdícios, a impressão 3D possibilita uma produção mais flexível, personalizada e sustentável. A adoção de materiais reciclados e a digitalização dos processos produtivos se mostraram essenciais para consolidar a manufatura aditiva como ferramenta estratégica na indústria moderna, contribuindo para a inovação e a sustentabilidade ambiental. Dessa forma, o estudo evidenciou que a combinação entre avanços tecnológicos e consciência ecológica é o caminho mais promissor para o futuro da engenharia de produção voltada a sistemas autônomos e leves.

Durante a realização da pesquisa, algumas limitações foram identificadas. Entre elas, destaca-se a dificuldade de acesso a estudos experimentais com dados quantitativos atualizados sobre o desempenho mecânico de materiais reciclados utilizados na impressão 3D. Também se reconhece que a aplicação prática da manufatura aditiva em larga escala ainda depende de infraestrutura tecnológica avançada e de investimentos contínuos em capacitação profissional e pesquisa aplicada. Outro desafio consiste na padronização de normas técnicas que garantam a confiabilidade e a certificação das peças produzidas por processos aditivos, especialmente no setor aeronáutico. Ainda assim, essas limitações não comprometem a validade dos resultados, mas indicam caminhos para futuras investigações e aperfeiçoamentos.

Conclui-se, portanto, que a manufatura aditiva é uma tecnologia transformadora e com grande potencial para o desenvolvimento de drones mais eficientes, sustentáveis e personalizados. O estudo permitiu compreender que, ao integrar conceitos de inovação, sustentabilidade e automação, é possível alcançar avanços significativos na engenharia de produção e no design de sistemas aéreos. A pesquisa reforça a importância de continuar investindo em conhecimento técnico e em soluções digitais inteligentes, de modo que a manufatura aditiva se consolide como pilar fundamental da Indústria 4.0 e como instrumento de inovação sustentável na sociedade contemporânea.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BETIM, TEIXEIRA, de S. de B.; GOMES, QUELHAS, SANTOS, Análise de cenários prospectivos: um estudo sobre a manufatura aditiva no Brasil em 2024. **Anais do XVI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT)**, Faculdades Dom Bosco, 2024. Disponível em: <https://aedb.br/seget>. Acesso em: 17 out. 2025.

MACIEL, ZONATTO. Otimização de processos de manufatura aditiva (impressão 3D) em peças mecânicas de alto desempenho. **Revista Científica Multidisciplinar O Saber (RCMOS)**, v. 1, n. 2, p. 1-10, ago./dez. 2025. DOI: <https://doi.org/10.51473/rcmos.v1i2.2025.1492>.

MAIA, CRUZ. **Estudo do emprego da manufatura aditiva para fabricação de componentes de interiores de aeronaves**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Processos de Produção Aeronáutica) – Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos “Professor Jessen Vidal”, São José dos Campos, 2024. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br>. Acesso em: 17 out. 2025.

MOREIRA, BONFIM, LIBERATO. A evolução da fabricação: comparação e sinergia entre manufatura aditiva e subtrativa. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 5, p. e9114548869, 2025. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i5.48869>.

NETTO, CARVALHO, RODRIGUEZ, STEFANO, LAGARES JÚNIOR, CASTAÑÓN. A utilização da manufatura aditiva no desenvolvimento de novos produtos e tecnologias no Brasil: uma revisão sistemática. **Revista ARACÊ**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 4, p. 13674–13714, dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev6n4-157>.

OLIVEIRA, CARVALHO. **Projeto de estrutura de drone para fabricação pelo processo de manufatura aditiva FDM em polímero ABS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br>. Acesso em: 17 out. 2025.

ROSS-VEITIA, MIKAMURA-BARCHI, NEGRI-PAGANI, CARVAJAL-FALS, VALADARES-SIQUEIRA. Otimização de trajetória na manufatura aditiva usando inteligência artificial: uma revisão sistemática da literatura. In: **XV Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção (ConBRepro)**. 2024. *Anais [...]*. UTFPR, Ponta Grossa, 2024. Disponível em: <https://aprepro.org.br>. Acesso em: 17 out. 2025.

SANTOS, FARIAS, SOUZA, LIMA. Desenvolvimento de um drone de carga por meio da manufatura aditiva utilizando material reciclado. In: **ENEGEP 2022 – Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2022. DOI: https://doi.org/10.14488/ENEGEP2022_TN_ST_386_1912_43730.

SILVA. **Análise da influência dos parâmetros de impressão 3D no comportamento estrutural de peças fabricadas com materiais poliméricos utilizando o processo FDM (Fused Deposition Modeling)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br>. Acesso em: 17 out. 2025.

VIEIRA, LISKEVYCH, ZIBEROV. Influência da estratégia de deposição de manufatura aditiva por deposição a arco via CMT na geometria da peça: uma revisão da literatura. **Soldagem & Inspeção**, v. 29, n. 7-8, out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si29.10>.