

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CC LUIZ FERNANDO STEOLA

**MANUTENÇÃO INTELIGENTE DE HELICÓPTEROS MILITARES:
Aplicação da Indústria 4.0 e Inteligência Artificial em Cenários de
Conflito**

Rio de Janeiro

2025

CC LUIZ FERNANDO STEOLA

**MANUTENÇÃO INTELIGENTE DE HELICÓPTEROS MILITARES:
Aplicação da Indústria 4.0 e Inteligência Artificial em Cenários de
Conflito**

Dissertação apresentada à Escola de Guerra Naval, como requisito parcial para conclusão do Curso de Estado-Maior para Oficiais Superiores.

Orientador: CF (RM1-EN) BRITO

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval
2025

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

Declaro que este trabalho acadêmico: a) corresponde ao resultado de investigação por mim desenvolvida, enquanto discente da Escola de Guerra Naval (EGN); b) é um trabalho original, ou seja, que não foi por mim anteriormente utilizado para fins acadêmicos ou quaisquer outros; c) é inédito, isto é, não foi ainda objeto de publicação; e d) é de minha integral e exclusiva autoria.

Declaro também que tenho ciência de que a utilização de ideias ou palavras de autoria de outrem, sem a devida identificação da fonte, e o uso de recursos de inteligência artificial no processo de escrita constituem grave falta ética, moral, legal e disciplinar. Ademais, assumo o compromisso de que este trabalho possa, a qualquer tempo, ser analisado para verificação de sua originalidade e ineditismo, por meio de ferramentas de detecção de similaridades ou por profissionais qualificados.

Os direitos morais e patrimoniais deste trabalho acadêmico, nos termos da Lei 9.610/1998, pertencem ao seu Autor, sendo vedado o uso comercial sem prévia autorização. É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos e ideias expressas neste trabalho acadêmico são de responsabilidade do Autor e não retratam qualquer orientação institucional da EGN ou da Marinha do Brasil.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta jornada acadêmica é um marco de profunda gratidão e realização. Em primeiro lugar, expresso minha sincera gratidão a Deus, por ter me concedido a força, a resiliência e a inspiração necessárias para superar cada etapa deste caminho.

Este trabalho é, acima de tudo, um reflexo do amor e do apoio incondicional de minha família. A minha mãe e meu padrasto, Lia e Douglas, que me deram o alicerce sólido sobre o qual construí minha vida e minha carreira. Ao meu pai, madrastra e irmã, Henrique, Esmeralda e Isabella, pelo apoio e incentivo constantes. À minha avó paterna, Neusa, por seu carinho e amor, e por sempre me incentivar com suas palavras. Em memória aos meus avós maternos, Silva e Solange e ao meu avô paterno Luiz, que me ensinou muito do que sei. Suas palavras de sabedoria e seu exemplo de caráter são a base de tudo o que sou.

À minha amada esposa, Danielle companheira de todas as jornadas e pilar essencial, que, além do apoio incondicional, assumiu com carinho e dedicação a responsabilidade pelo nosso lar durante minha ausência na conclusão deste trabalho. Seu apoio foi a inspiração que me impulsionou a seguir em frente. Ao meu filho, Matheus, você é a razão e a inspiração de tudo o que faço. Seu sorriso e seu carinho me renovavam e fortaleciam a cada fim de semana. Cada momento de ausência dedicado a este estudo foi um reflexo do meu desejo de lhe deixar um legado de amor e dedicação.

Agradeço meu orientador, Capitão de Fragata (RM1-EN) José Roberto Brito de Souza, pela sua disponibilidade e orientações assertivas, importantes para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos companheiros da turma CEMOS-2025, que me acolheram, agradeço pelo respeito, apoio e incentivo, especial agradecimento aos meus amigos Bruno Veras e André Garcia pela amizade e convivência ao longo dessa jornada.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero e eterno obrigado.

RESUMO

Esta dissertação investiga a otimização da manutenção de helicópteros militares, pela aplicação da Indústria 4.0 e Inteligência Artificial (IA) em cenários de conflito. Em um panorama estratégico que exige elevada prontidão operacional, o trabalho reafirma a necessidade de transitar de paradigmas de manutenção tradicionais para abordagens proativas e preditivas.

O estudo estabelece um sólido arcabouço teórico, detalhando a evolução da manutenção e os pilares da Indústria 4.0 que possibilitam o monitoramento em tempo real e a antecipação de falhas. A IA é explorada em suas diversas aplicações na manutenção aeronáutica e no contexto militar, demonstrando seu potencial transformador para garantir maior disponibilidade e resiliência.

É proposto um modelo conceitual de manutenção inteligente para helicópteros militares, delineando sua arquitetura baseada em coleta de dados abrangente, infraestrutura robusta, análise avançada por IA e uma interface *Human-in-the-Loop*. Esse modelo visa aprimorar o diagnóstico e o prognóstico, otimizando reparos e alocação de recursos.

O estudo de conflitos reais ilustra as severas limitações da manutenção tradicional, impulsionando a evolução para modelos inteligentes. A aplicação do modelo proposto teria mitigado dificuldades operacionais, elevando a disponibilidade. Essa capacidade reflete a profunda transformação da manutenção militar atual, evoluindo de um modelo reativo para proativo, preditivo e prescritivo.

Em síntese, a dissertação oferece um roteiro teórico-conceitual para a implementação da manutenção inteligente, focando nos helicópteros militares, evidenciando seu papel estratégico na garantia da prontidão operacional e na otimização de recursos em cenários de batalha.

Palavras-chave: Manutenção Inteligente. Helicópteros Militares. Inteligência Artificial. Indústria 4.0. Cenários de Conflito. Logística Militar. Manutenção Preditiva. Prontidão Operacional.

ABSTRACT

INTELLIGENT MAINTENANCE OF MILITARY HELICOPTERS: Application of Industry 4.0 and Artificial Intelligence in Conflict Scenarios

This dissertation investigates the optimization of military helicopter maintenance through the application of Industry 4.0 and Artificial Intelligence (AI) in conflict scenarios. In a strategic landscape demanding high operational readiness, this work reaffirms the necessity of transitioning from traditional maintenance paradigms to proactive and predictive approaches.

The study establishes a solid theoretical framework, detailing the evolution of maintenance and the pillars of Industry 4.0 that enable real-time monitoring and fault anticipation. AI is explored across its diverse applications in aeronautical maintenance and the military context, demonstrating its transformative potential to ensure greater availability and resilience.

A conceptual model for intelligent maintenance of military helicopters is proposed, outlining its architecture based on comprehensive data collection, robust infrastructure, advanced AI-driven analysis, and a Human-in-the-Loop interface. This model aims to enhance diagnosis and prognosis, optimizing repairs and resource allocation.

The study of real conflicts illustrates the severe limitations of traditional maintenance, propelling the evolution towards intelligent models. The proposed model's application would have mitigated operational difficulties, increasing availability. This capability reflects the profound transformation of current military maintenance, evolving from a reactive model to proactive, predictive, and prescriptive.

In summary, this dissertation offers a theoretical-conceptual roadmap for implementing intelligent maintenance, focusing on military helicopters, highlighting its strategic role in ensuring operational readiness and optimizing resources in battlefield scenarios.

Keywords: Intelligent Maintenance. Military Helicopters. Artificial Intelligence. Industry 4.0. Conflict Scenarios. Military Logistics. Predictive Maintenance. Operational Readiness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Diagrama de falhas potenciais apresentando intervalos de inspeção e manutenção preditiva.....	57
FIGURA 2 - O processo de PHM proposto.....	57
FIGURA 3 - Evolução das atividades e métodos de manutenção.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIMI	-	<i>Aircraft Intensively Managed Items</i>
AOG	-	<i>Aircraft on Ground</i> (Aeronave em Solo)
art.	-	Artigo(s)
ASW	-	<i>Anti-Submarine Warfare</i> (Guerra Anti-submarino)
CENIPA	-	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CNN	-	<i>Convolutional Neural Network</i>
DoD	-	Departamento de Defesa dos EUA
DP	-	<i>Deep Learning</i> (Aprendizado Profundo)
EASA	-	<i>European Union Aviation Safety Agency</i>
EMA	-	Estado Maior da Armada
EUA	-	Estados Unidos da América
FA	-	Forças Armadas
FAB	-	Força Aérea Brasileira
FT	-	Força-Tarefa
HUMS	-	<i>Health and Usage Monitoring Systems</i>
IA	-	Inteligência Artificial
IoT	-	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IVR	-	Inteligência, Vigilância e Reconhecimento
LSTM	-	<i>Long Short-Term Memory</i>
MB	-	Marinha do Brasil
MBC	-	Manutenção Baseada em Condição
MCC	-	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MDAU	-	<i>Modular Data Acquisition Units</i> (Aquisição de Dados Embarcadas)
MHC	-	<i>Meaningful Human Control</i>
ML	-	<i>Machine Learning</i> (Aprendizado de Máquina)
MP	-	Manutenção Preventiva
MPd	-	Manutenção Preditiva
NBR	-	Norma Brasileira
OTAN	-	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PHM	-	<i>Prognostics & Health Management</i>
PLN	-	Processamento de Linguagem Natural
RA	-	Realidade Aumentada

RAF	- <i>Royal Air Force</i> (Força Aérea Real Britânica)
RN	- <i>Royal Navy</i> (Marinha Real Britânica)
RNA	- Rede Neural Artificial
RUL	- <i>Remaining Useful Life</i> (Tempo Remanescente de Vida Útil)
SAR	- <i>Search and Rescue</i> (Busca e Salvamento)
TI	- Tecnologia da Informação
UGV	- <i>Unmanned Ground Vehicle</i> (Veículo Terrestre não Tripulado)
USS	- <i>United States Ship</i>
VANT	- Veículo aéreo não tripulado

LISTA DE SÍMBOLOS

nº	Número(s)
%	Porcentagem
p.	Página(s)
km	Quilômetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	DO TRADICIONAL AO INTELIGENTE: A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO NA ERA DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	14
2.1	INDÚSTRIA 4.0 E SUA APLICAÇÃO.....	15
2.2	BASE CONCEITUAL DA MANUTENÇÃO E SEUS MODELOS.....	17
2.2.1	Modelos de Manutenção.....	18
2.3	PROGRAMAS DE MANUTENÇÃO APLICÁVEIS À AVIAÇÃO E TECNOLOGIAS EMBARCADAS.....	20
2.3.1	Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC).....	20
2.3.2	Manutenção Baseada em Condição (MBC).....	21
2.3.3	Manutenção Baseada em Prognósticos e Saúde Operacional (<i>Prognostics & Health Management</i> – PHM).....	21
2.3.4	Sensores Embarcados em Helicópteros e a Coleta de Dados para Manutenção Inteligente.....	22
3	APLICAÇÕES DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AVIAÇÃO MILITAR.....	24
3.1	MANUTENÇÃO 4.0: O IMPACTO DA IA NA AVIAÇÃO DE ASAS ROTATIVAS.....	24
3.2	A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO TEATRO DE OPERAÇÕES.....	28
3.3	SUSTENTAÇÃO LOGÍSTICA DE AERONAVES COM SUPORTE DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	30
4	PROPOSTA DE MODELO PARA MANUTENÇÃO INTELIGENTE EM HELICÓPTEROS.....	33
4.1	FUNDAMENTOS DE UM MODELO INTELIGENTE.....	34
4.2	ARQUITETURA PROPOSTA PARA HELICÓPTEROS MILITARES.....	35
4.3	DESAFIOS E FATORES CRÍTICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO EM CENÁRIOS DE CONFLITO.....	37

5	MANUTENÇÃO DE HELICÓPTEROS MILITARES EM CENÁRIOS DE CONFLITO.....	41
5.1	A EVOLUÇÃO NA MANUTENÇÃO DE HELICÓPTEROS NAS GUERRAS DO VIETNÃ E AFEGANISTÃO.....	41
5.2	MANUTENÇÃO DE HELICÓPTEROS NAS MALVINAS E O POTENCIAL DO USO DA INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	44
6	CONCLUSÃO.....	48
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE - QUADRO COM OS PRINCIPAIS SENSORES UTILIZADOS EM HELICÓPTEROS.....	56
	ANEXO A – FIGURAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

No cenário geopolítico e tecnológico atual, a capacidade de uma força militar projetar e sustentar poder em conflitos é diretamente proporcional à eficiência de sua cadeia logística e à prontidão operacional. Entre os vetores mais versáteis e indispensáveis estão os helicópteros, cujas capacidades de decolagem e pouso vertical, mobilidade tática e flexibilidade operacional os tornam essenciais para diversas missões, como reconhecimento, transporte e combate.

A manutenção eficaz desses ativos é um pilar estratégico para garantir a segurança e o sucesso das missões. Tradicionalmente, os processos de manutenção militar enfrentam desafios intrínsecos, como longas cadeias de suprimentos, ambientes hostis e a necessidade de reparos rápidos e sob pressão, evidenciados em conflitos históricos.

A Quarta Revolução Industrial, impulsionada pela Indústria 4.0 e, em particular, pela Inteligência Artificial (IA), redefine a gestão de ativos em diversos setores. Ela oferece soluções inovadoras para complexidades operacionais. A aplicação dessas tecnologias na manutenção, conhecida como manutenção inteligente ou Manutenção 4.0, promete transformar a forma como os meios são aparelhados, reaparelhados e mantidos.

A IA pode elevar a disponibilidade operacional, reduzir custos e fortalecer a capacidade de defesa e ação de Estados em um panorama global de incertezas. Ela permite monitoramento em tempo real, previsão de falhas e otimização de recursos. Fazendo dela um importante ativo.

Nesse contexto, este estudo propõe-se a investigar como a Indústria 4.0 e a Inteligência Artificial podem revolucionar a manutenção de helicópteros militares, com especial atenção às exigências e desafios únicos dos cenários de conflito. Ao abordar inovações tecnológicas, como a Manutenção Baseada em Condição (MBC), uso de sensores embarcados, integração digital e sistemas de previsão de falhas, busca-se entender como essas ferramentas podem melhorar a disponibilidade e a eficiência das aeronaves de asa rotativa.

Abordaremos a evolução dos conceitos de manutenção e os fundamentos da Indústria 4.0 e da Inteligência Artificial no setor de defesa; as aplicações da IA na manutenção aeronáutica e no ambiente militar, destacando seu impacto na logística em cenários de guerra; e iremos propor um modelo conceitual de manutenção

inteligente para helicópteros navais, detalhando sua arquitetura e os desafios da implementação em ambientes de conflito. Por último, discutiremos a manutenção dos helicópteros militares em conflitos passados.

A justificativa para esta pesquisa reside na crescente complexidade dos meios militares, especialmente os helicópteros, e nas exigências de um ambiente em constante mutação. A adoção de manutenção inteligente não é apenas uma questão de eficiência técnica, mas uma necessidade estratégica para as Forças Armadas (FA), visando garantir a resiliência da frota de helicópteros e otimizar recursos em um cenário de restrições. Ao oferecer um roteiro teórico-conceitual, este trabalho pretende contribuir para o debate e o planejamento estratégico em defesa nacional, subsidiando futuras iniciativas de modernização logística e operacional.

Ao longo desse estudo iremos explorar o conteúdo da pesquisa, tentando ao final responder à questão central do trabalho: Como a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 e da IA na manutenção de helicópteros militares pode impactar a disponibilidade operacional das aeronaves em cenários de conflito?

A dissertação está estruturada nos seguintes capítulos: o primeiro é a introdução. O segundo fixa as considerações teóricas, apresentando a evolução dos conceitos de manutenção e os pilares tecnológicos da Indústria 4.0 e da Inteligência Artificial. O terceiro detalha o uso da IA na manutenção aeronáutica e em ambientes militares. O quarto descreve um modelo conceitual, sua arquitetura e os desafios de implementação. O quinto utiliza três grandes guerras como estudo de caso, analisando os desafios históricos e o potencial da manutenção em helicópteros no campo de batalha. Por fim, as considerações finais resumem as contribuições do trabalho, suas implicações e sugestões para futuras pesquisas.

2 DO TRADICIONAL AO INTELIGENTE: A EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO NA ERA DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A construção do arcabouço teórico é a base conceitual e analítica desta pesquisa. Ela é essencial para entender a aplicação de tecnologias emergentes, como a Indústria 4.0 e a Inteligência Artificial, na manutenção de helicópteros militares. Este capítulo apresenta as principais tendências teóricas e doutrinárias da manutenção de aeronaves, sua evolução histórica, os fundamentos logísticos em cenários de conflito e as transformações recentes da digitalização e automação inteligente.

Historicamente, os conceitos de manutenção evoluíram de modelos corretivos e preventivos para abordagens modernas, baseadas em confiabilidade, condição operacional e prognóstico. O desenvolvimento da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) e da Manutenção Baseada na Condição melhorou o gerenciamento da integridade de aeronaves militares em ambientes operacionais. Esses modelos incorporaram ferramentas digitais e de inteligência artificial, culminando no que hoje se denomina manutenção inteligente ou manutenção preditiva avançada.

A ascensão da Indústria 4.0 consolidou um novo paradigma para os sistemas de logística de defesa. A integração de sensores de bordo, Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT)¹, *Big Data*² e *Machine Learning* (ML)³, tornou-se possível monitorar a saúde estrutural das aeronaves em tempo real e antecipar falhas antes que elas afetem a missão. A IA aplicada à manutenção de aeronaves, inicialmente explorada em programas civis de larga escala, como nas empresas Boeing e Airbus, começou a ser incorporada às doutrinas de logística militar por países como os Estados Unidos da América (EUA), Índia, China, Alemanha e outros da OTAN.

Este capítulo abordará os fundamentos da Indústria 4.0 e sua aplicação nos diversos segmentos, focando no setor de defesa e destacando os elementos tecnológicos. Em seguida, serão apresentados os princípios da manutenção

¹ Internet das Coisas (IoT): Rede de dispositivos com sensores, *software* e tecnologias que permitem a conexão e troca de dados com outros dispositivos e sistemas pela internet. (Achouch et al., 2022)

² *Big Data* : Termo que descreve grandes volumes de dados, estruturados e não estruturados, que são processados e analisados para extrair informações e *insights*. (Achouch et al., 2022)

³ *Machine Learning* (ML): Subcampo da IA que permite sistemas identifiquem padrões e realizem previsões com base em experiências anteriores, sem prévia programação. (Achouch et al., 2022)

aeronáutica, com ênfase na manutenção de helicópteros. Ao final, citaremos o uso da inteligência artificial, abrangendo conceitos utilizados na aviação civil e militar.

2.1 INDÚSTRIA 4.0 E SUA APLICAÇÃO

A Indústria 4.0 representa um marco na evolução da produção industrial, sendo considerada a Quarta Revolução Industrial. O conceito surgiu em 2011, durante a Feira de Hannover na Alemanha, um dos maiores eventos de tecnologia. A proposta visava consolidar a liderança do país na manufatura avançada, ao propor uma transformação sistêmica das cadeias de valor por meio da integração de tecnologias digitais, físicas e biológicas (Schwab, 2016).

O nome “Indústria 4.0” refere-se à sequência das revoluções industriais. A primeira Revolução Industrial, ocorrida no final do século XVIII, foi marcada pela mecanização e uso do vapor. A segunda, no final do século XIX, introduziu eletricidade, linhas de montagem e produção em massa. A terceira, a partir da década de 1970, incorporou automação industrial com eletrônica, informática e sistemas integrados de produção (Poór et al., 2019).

Essa quarta revolução refere-se à transformação das cadeias globais de valor por meio da agregação entre sistemas físicos e virtuais. Ela inaugura um novo paradigma técnico e organizacional baseado na conectividade digital, tomada de decisão descentralizada, autonomia dos sistemas ciberfísicos⁴, e na integração em tempo real de dados provenientes de sensores, máquinas, pessoas e sistemas.

Tal revolução possibilita a criação de fábricas colaborativas e flexíveis, promove a personalização de produtos e a adoção de novos modelos operacionais, caracterizando uma transformação significativa nos sistemas de produção e logística (Schwab, 2016).

A mudança envolve a integração de tecnologias digitais, automação inteligente e conectividade em tempo real. As principais características da Indústria 4.0 incluem

⁴ Sistemas ciberfísicos são integrações entre componentes computacionais e físicos, interconectados em redes inteligentes, capazes de monitorar, controlar e responder a eventos do ambiente em tempo real. (Achouch et al., 2022)

IoT, Computação em Nuvem⁵, *Big Data*, sistemas ciberfísicos, impressão 3D⁶ e IA. A IA é o principal ramo da ciência computacional atual, focado no desenvolvimento de máquinas e programas que simulam a inteligência humana. Envolve aprendizado, raciocínio, resolução de problemas, percepção e compreensão da linguagem natural, para automatizar e otimizar tarefas complexas. Na esfera militar, esses avanços estão sendo integrados para melhorar a eficiência, rastreabilidade e capacidade de resposta operacional.

Essas tecnologias desempenham um papel importante, introduzindo a automação cognitiva e implementam o conceito de produção inteligente, convertendo fábricas convencionais em fábricas inteligentes. Isso permite autoajuste dinâmico, produção em massa personalizada e integração entre fornecedores, fabricantes e consumidores (Achouch et al., 2022).

O progresso da Indústria 4.0 desencadeou uma discussão acadêmica sobre suas implicações sociais, econômicas e estratégicas. No setor de defesa, ele impulsionou mudanças significativas nos sistemas de manutenção de equipamentos e meios militares, como helicópteros, aumentando a previsibilidade, a disponibilidade operacional e reduzindo as despesas logísticas.

Na quarta revolução industrial, surgiram conceitos paralelos, como a manutenção preditiva, que desempenha um papel fundamental em sistemas de fabricação e produção sustentáveis, introduzindo uma versão digital da manutenção da máquina (Achouch et al., 2022).

Com o avanço das tecnologias de detecção, o volume de dados gerados nos processos produtivos aumentou significativamente. Apesar dos obstáculos enfrentados pela Indústria 4.0, essa abordagem continua a representar uma vantagem estratégica. Ela permite que as empresas maximizem a vida útil de seus equipamentos de produção, evitem o tempo de inatividade não planejado, reduzam o tempo de inatividade planejado, aumentem a segurança do processo e das pessoas, minimizem o consumo de energia e recursos e economizem custos (Jasiulewicz-Kaczmarek; Gola, 2019).

⁵ Computação em Nuvem: Modelo de fornecimento de serviços de computação — incluindo servidores, armazenamento, bancos de dados, redes, *software*, análise e inteligência (Achouch et al., 2022)

⁶ Impressão 3D: Processo de criação de um objeto tridimensional por meio da adição sucessiva de camadas de material (como plástico, metal, cerâmica, etc.), a partir de um modelo digital.

No contexto das Forças Armadas, a Indústria 4.0 possibilita avanços na manutenção e suporte, especialmente em zonas de conflito. Diagnósticos automatizados, monitoramento contínuo e sensores reduzem falhas não planejadas e permitem ações preditivas. Além disso, a integração de dados entre plataformas e centros logísticos contribui para decisões mais precisas.

As ferramentas computacionais avançadas da Quarta Revolução Industrial tornaram-se a base da transformação digital na Indústria 4.0. Elas foram incorporadas pelos setores de manufatura, especialmente na manutenção preditiva, surgindo o conceito de Manutenção 4.0, focado na análise em tempo real e antecipação de falhas. As principais ferramentas tecnológicas (IoT, *Big Data*, IA e sistemas ciberfísicos) derivam dos pilares da Indústria 4.0.

2.2 BASE CONCEITUAL DA MANUTENÇÃO E SEUS MODELOS

Máquinas e equipamentos sofrem desgaste constante ao longo do tempo, e a manutenção é o pilar fundamental para aplicar teorias de reparos e conservação do material em evolução tecnológica. Nesse contexto, segundo Kardec e Nascif (2013), a visão de que a manutenção é o restabelecimento das condições originais de equipamentos ou sistemas é considerada ultrapassada.

Segundo a Marinha do Brasil (MB) EMA 400 - Manual de Logística da Marinha (2003), o conceito de manutenção é definido como:

É o conjunto de atividades que são executadas visando a manter o material (meios e sistemas) e o software utilizados pela MB na melhor condição para emprego e, quando houver defeitos ou avarias, reconduzi-lo àquela condição (Brasil, 2003, p. 4-4).

A manutenção é um conjunto de ações técnicas e gerenciais para garantir o funcionamento contínuo de equipamentos e instalações, confiabilidade operacional, a segurança das atividades, o respeito ao meio ambiente e a otimização de custos. Essa abordagem busca não apenas manter, mas também restaurar os sistemas (Kardec; Nascif, 2013).

É importante entender conceitos como a manutenção baseada em monitoramento contínuo, que utiliza sensores para coletar dados em tempo real sobre variáveis como temperatura, vibração, pressão e lubrificação. Ela pode ser realizada de forma subjetiva (pelos sentidos humanos) ou objetiva (com instrumentos de

medição). O diagnóstico consiste na análise dessas medições para identificar a causa raiz de falhas, com base em alterações convertidas em dados quantificáveis. O prognóstico antecipa o momento e o modo como possíveis falhas ocorrerão, possibilitando o planejamento preventivo de intervenções e aumentando a confiabilidade e eficiência dos sistemas monitorados (Neto, 2024).

2.2.1 Modelos de Manutenção

Os modelos de manutenção evoluíram ao longo do tempo, acompanhando os avanços tecnológicos e as exigências operacionais. Inicialmente centradas em ações corretivas e preventivas, as estratégias passaram a incorporar abordagens mais inteligentes e orientadas por dados. A manutenção preditiva surge como um modelo moderno, voltado à antecipação de falhas e à otimização do desempenho dos ativos.

Comparando os modelos de manutenção, na corretiva a intervenção ocorre após a falha, visando restaurar o equipamento (ABNT, 1994). É a abordagem mais simples, mas causa perda de disponibilidade pois somente reage à falha. As manutenções corretivas permitem que os sistemas operem até uma quebra, com o reparo iniciado somente após a quebra do componente.

Santos (2013) descreve a manutenção corretiva não planejada como imprevisível e realizada após a identificação da avaria. Em contraste, na planejada, as intervenções são agendadas em intervalos definidos, mesmo que o defeito não cause paralisação imediata. Ela será mais oportuna quanto mais simples for a reposição e maiores os custos de falhas.

A Manutenção Preventiva (MP) segue cronogramas preestabelecidos, onde são definidos intervalos de tempo ou ciclos de uso para substituir componentes antes da falha, conforme normas técnicas. Segundo Kardec e Nascif (2013), a manutenção preventiva consiste em intervenções planejadas de acordo com um cronograma, visando diminuir a probabilidade de falhas ou a redução do desempenho.

Nesse modelo de manutenção, a efetividade depende da facilidade de reposição de componentes e dos custos associados a possíveis falhas. Embora vise evitar defeitos e manter a performance dentro dos padrões, a adoção exclusiva desse modelo, de forma isolada e sem o suporte de outras estratégias, pode resultar em elevados gastos e baixa eficiência.

Já a manutenção proativa utiliza abordagens similares às da manutenção preventiva, porém com foco em ações antecipadas. Seu principal objetivo é preservar a estabilidade dos sistemas ou equipamentos, agindo de forma a evitar que falhas ou quebras. A manutenção proativa é uma abordagem estratégica que visa eliminar as causas das falhas antes que elas se manifestem. Ela difere das práticas convencionais que atuam apenas após sinais de desgaste ou quebra.

Essa filosofia busca a estabilização e a confiabilidade dos sistemas por meio de intervenções antecipadas. Ela se assemelha à manutenção preventiva nos métodos, mas difere por atuar nos fatores que podem gerar falhas, promovendo maior disponibilidade e redução de custos de ciclo de vida dos ativos (Santos, 2024).

De acordo com Moubray (1997), a manutenção proativa está alinhada com os princípios da excelência operacional e representa um estágio avançado nas estratégias de manutenção. Sua essência reside em assegurar que os ativos físicos desempenhem as funções desejadas por seus usuários, indo além da prevenção de falhas para focar na mitigação de suas consequências.

A Manutenção Preditiva (MPd) é um modelo de manutenção baseado no monitoramento contínuo da condição dos equipamentos, permitindo prever e prevenir falhas antes que aconteçam. Esse tipo de manutenção distingue-se dos modelos corretivo e preventivo, pois utiliza análise de dados e acompanhamento regular.

Essa manutenção é uma evolução moderna da manutenção preventiva, voltada para aprimorar o desempenho e a eficiência dos processos produtivos. Seu objetivo é prolongar a vida útil dos equipamentos e contribuir para uma gestão operacional mais sustentável, planejando intervenções de forma mais assertiva. Essa abordagem busca reduzir o tempo de inatividade e evitar paradas desnecessárias, ao mesmo tempo que diminui os custos com reparos, prevendo possíveis falhas (Jasiulewicz-Kaczmarek; Gola, 2019).

Esse modelo, segundo Santos (2024), detalha cuidadosamente os itens físicos sujeitos a controle, garantindo a integridade mecânica, mas também a qualidade do produto final gerado pelo equipamento. Dessa maneira, a MPd identifica a necessidade de uma intervenção, baseada no monitoramento constante de parâmetros e indicadores de condições.

A MPd é estratégica na disponibilidade operacional das aeronaves militares, oferecendo a maior vida útil e a maior confiabilidade dos equipamentos (mostrado no diagrama da Figura 1). Ela permite agendar reparos flexíveis ao detectar problemas

incipientes, reduzindo inesperados *Aircraft on Ground* (AOG)⁷ e maximizando o tempo “no ar” das aeronaves.

A análise dos modelos de manutenção revela uma transição para abordagens mais eficientes e tecnológicas. A MPd, ao utilizar dados e monitoramento em tempo real, representa um avanço estratégico na gestão de ativos, especialmente em setores críticos como o aeronáutico. Sua aplicação contribui para a redução de custos, aumento da disponibilidade e previsibilidade operacional. Assim, torna-se um pilar essencial nas práticas de manutenção da Indústria 4.0.

2.3 PROGRAMAS DE MANUTENÇÃO APLICÁVEIS À AVIAÇÃO E TECNOLOGIAS EMBARCADAS

A evolução das estratégias de manutenção reflete a crescente complexidade dos sistemas industriais e militares, exigindo modelos sofisticados para garantir disponibilidade e segurança. Estratégias consolidadas foram complementadas por prognósticos avançados e pela aplicação de inteligência artificial na engenharia de manutenção. Apresentaremos abordagens em gestão que complementam as teorias do subcapítulo anterior, para embasar a adoção de manutenção inteligente em helicópteros militares.

2.3.1 Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC)

A MCC surgiu na década de 1970 para atender à aviação civil e logo se estendeu ao setor militar. Seu foco é garantir que os equipamentos cumpram suas funções em condições operacionais específicas, priorizando modos de falhas críticas e minimizando intervenções desnecessárias (Moubray, 1997).

A MCC usa ferramentas e avaliações de impacto operacional para estruturar programas de manutenção que garantam a continuidade das missões. Em esquadrões de helicópteros, a MCC determina inspeções em componentes críticos, como sistemas hidráulicos e hélices, com base no efeito no desempenho da missão,

⁷ *Aircraft on Ground* (AOG) é uma condição crítica na aviação que ocorre quando uma aeronave está impedida de voar devido a problemas técnicos, exigindo ação imediata de manutenção para evitar atrasos operacionais e prejuízos logísticos (Bostonair, 2025).

considerando a gravidade, a chance de panes e a facilidade de identificá-las (Pereira, 2020).

2.3.2 Manutenção Baseada em Condição (MBC)

A MBC utiliza medições diretas de parâmetros físicos (vibração, temperatura, pressão) para avaliar em tempo real o estado dos ativos. Ela se distingue do modelo preventivo por atuar apenas quando os indicadores ultrapassam patamares definidos. A MBC reduz o custo da manutenção ao planejar intervenções somente quando há necessidade real (Jardine, Lin e Banjevic, 2006).

Nos helicópteros militares, a MBC é aplicada por sensores embarcados que transmitem dados para diagnósticos remotos. Por exemplo, unidades de aquisição em plataformas como o UH-60 Black Hawk monitoram vibrações nos eixos de transmissão, permitindo que a equipe detecte desgastes iniciais e programe a troca de rolamentos antes da falha crítica (Antol, Kim, Lorenzo, 2009).

Na aviação, a Manutenção Baseada em Condição permite prever falhas, otimizar operações e aumentar a disponibilidade das aeronaves. Verhagen *et al.* (2023) ressaltam que prever falhas com precisão transforma o planejamento das companhias aéreas, tornando-o mais eficiente e seguro. No contexto militar, isso se traduz em maior prontidão das frotas e menor tempo de manutenção.

2.3.3 Manutenção Baseada em Prognósticos e Saúde Operacional (*Prognostics & Health Management* – PHM)

O conceito de manutenção baseada em prognósticos e saúde operacional (PHM) amplia a MBC ao incorporar modelos analíticos que preveem o tempo remanescente de vida útil (*Remaining Useful Life* – RUL)⁸ dos componentes por meio de algoritmos estatísticos e ML. Essa abordagem integra módulos de aquisição, diagnóstico, prognóstico e gestão de saúde em sistemas críticos, promovendo maior confiabilidade, segurança e redução de custos operacionais (Fu et al., 2023). A Figura 2 demonstra o processo do PHM.

⁸ *Remaining Useful Life* (RUL): estimativa do tempo ou ciclos restantes antes que um componente ou sistema atinja um nível crítico de degradação ou falha. Essencial para estratégias de manutenção preditiva (Fu et al., 2023).

Na aviação militar, o PHM otimiza o planejamento de manutenção de motores e sistemas críticos de voo. Estudos mostraram que modelos de prognóstico aplicados a trem de pouso de aeronaves garantiram máxima disponibilidade (Liao et al., 2022). Essas abordagens possibilitam a transição de estratégias reativas para ações preditivas, otimizando a disponibilidade operacional e reduzindo custos de manutenção não planejada.

2.3.4 Sensores Embarcados em Helicópteros e a Coleta de Dados para Manutenção Inteligente

A adoção da MBC e da PdM depende da capacidade de monitorar continuamente o estado operacional dos sistemas críticos das aeronaves. Nesse contexto, os sensores embarcados desempenham um papel estratégico, fornecendo dados em tempo real sobre temperatura, vibração, pressão, desgaste, velocidade de rotação e integridade estrutural dos componentes mecânicos e eletrônicos dos helicópteros.

Nos helicópteros modernos, esses sensores são integrados aos sistemas *Health and Usage Monitoring Systems* (HUMS)⁹, que captam, armazenam e transmitem informações para centros de manutenção. A aplicação de sensores em componentes como caixas de transmissão, rotores, motores e sistemas hidráulicos permite diagnóstico antecipado de falhas, otimização do ciclo de vida das peças e redução de paradas não programadas. (Romero; Summers; Cronkhite, 1996)

Os sensores instalados em helicópteros operam com alta confiabilidade e desempenham um papel essencial no monitoramento contínuo das condições operacionais, permitindo a identificação precoce de anomalias e possíveis falhas. Dentre eles, os acelerômetros piezoelétricos são amplamente utilizados em sistemas de HUMS para monitorar vibrações nos rotores e motores, capazes de detectar falhas incipientes em condições adversas (Brüel & Kjær, 2025).

Termopares e termistores complementam esse conjunto, monitorando o calor gerado por sistemas críticos e alertando para situações de sobreaquecimento — uma prática consolidada na manutenção de sistemas mecânicos (Touret et al., 2018). Além

⁹ HUMS (*Health and Usage Monitoring System*) é um sistema embarcado de monitoramento contínuo que coleta, processa e analisa dados sobre as condições estruturais e operacionais de uma aeronave. Seu objetivo é identificar precocemente falhas (Romero; Summers; Cronkhite, 1996).

disso, sensores indutivos, ópticos e piezorresistivos são empregados para avaliar o desgaste, detectar partículas metálicas no óleo e medir pressão em componentes hidráulicos e de combustível, contribuindo de forma eficaz para diagnósticos preventivos e a segurança operacional (Han et al., 2023).

A análise evidencia que a combinação de diferentes tecnologias sensoriais utilizados em helicópteros, conforme demonstrado no Quadro 1, forma uma base confiável para o diagnóstico precoce de *panes*. Esses sensores permitem monitorar vibrações, temperaturas, desgaste, presença de partículas metálicas e pressão em sistemas críticos, antecipando problemas antes que se agravem.

A instrumentação dos helicópteros com sensores inteligentes representa a base da manutenção inteligente e reflete os princípios da Indústria 4.0 no setor aeroespacial. Os dados desses dispositivos são analisados por algoritmos de aprendizado de máquina, que identificam padrões de degradação e recomendam intervenções preventivas, fortalecendo a segurança operacional e contribuindo para uma logística mais eficiente.

Nesse capítulo foi apresentada a evolução das estratégias de manutenção, desde os modelos corretivo e preventivo até as mais avançadas, culminando na aplicação de Inteligência Artificial, ilustrado na Figura 3. A Indústria 4.0 e seus pilares tecnológicos transformam a gestão de ativos, permitindo diagnósticos em tempo real e prognósticos precisos.

Os avanços dos programas de manutenção com tecnologias avançadas apoiam decisões logísticas e operacionais, elevando a disponibilidade e reduzindo custos. No contexto militar, especialmente para helicópteros em cenários *hostis*, tais teorias são fundamentais para garantir prontidão e segurança. Assim, a base teórica apresentada oferece subsídios para o desenvolvimento de soluções de Manutenção 4.0 na aviação militar.

3 APLICAÇÕES DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AVIAÇÃO MILITAR

Este capítulo apresenta as principais aplicações da Inteligência Artificial na manutenção aeronáutica, operações militares e logística de aviação em cenários de guerra. Vamos explorar as críticas aplicações da IA, com foco em seu impacto na manutenção aeronáutica e nos complexos ambientes militares.

A IA, um pilar tecnológico da Quarta Revolução Industrial, oferece capacidades sem precedentes para otimizar processos, prever falhas com maior precisão e aprimorar a tomada de decisão em cenários complexos e críticos, como os de conflito. Sua integração não é apenas uma evolução tecnológica, mas uma reconfiguração das operações e sustentação das FA.

Serão abordados os fundamentos da aplicação da IA na manutenção de aeronaves, detalhando como suas ramificações podem ser empregadas para maximizar a disponibilidade e a segurança. A discussão se expandirá para o uso da IA em ambientes militares, demonstrando sua influência em operações, inteligência, cibersegurança e logística. Será mostrado como a visão computacional e modelos preditivos apoiam decisões e planejamentos.

O capítulo apresentará fundamentos teóricos, exemplos de implementações reais e resultados de estudos que evidenciam os ganhos de eficiência e segurança da Manutenção 4.0. Ele culminará na análise de como a IA redefine e fortalece a logística de aviação em cenários de guerra, enfatizando a otimização de rotas de reabastecimento, gestão de estoques e distribuição autônoma de sobressalentes, elementos estratégicos para a projeção de poder e a resiliência das forças em combate.

3.1 MANUTENÇÃO 4.0: O IMPACTO DA IA NA AVIAÇÃO DE ASAS ROTATIVAS

A manutenção aeronáutica, complexa, com sistemas heterogêneos e rigorosos requisitos de segurança e confiabilidade, tem sido um campo fértil para a inovação impulsionada pela Inteligência Artificial. A transição evolui de modelos de manutenção reativos (corretivos) ou baseados em tempo (preventivos) para abordagens centradas em dados.

A capacidade da IA de processar e interpretar grandes volumes de dados, identificar padrões complexos e extrair *insights* que escapariam à análise humana

permitiu a prevenção de falhas com elevada precisão e acelerou a transformação da manutenção, oferecendo benefícios significativos para o setor aeronáutico. Entre os principais, destacam-se a melhora na tomada de decisões, a segurança, a eficiência, a otimização de processos e a economia de tempo.

O benefício da IA na manutenção aeronáutica reside na capacidade de prever falhas em componentes críticos antes que ocorram, transformando a gestão de ativos de reativa para proativa. A incorporação da Inteligência Artificial aos processos de manutenção aeronáutica reduz intervenções não planejadas, diminuindo atrasos e indisponibilidade de aeronaves (Lu, 2024).

Além disso, o uso da manutenção preditiva torna-se ainda mais eficaz com suporte de IA em tempo real. Isso favorece a identificação antecipada de falhas potenciais, permitindo ações corretivas proativas antes que essas comprometam a segurança operacional (Deloitte, 2023).

O conceito fundamental da IA, *Machine Learning*, utiliza grandes volumes de dados históricos, como parâmetros de voo, registros de manutenção e condições ambientais, para treinar modelos preditivos. Esses modelos detectam falhas e o *RUL* de componentes, permitindo prever com precisão.

Outra aplicação inovadora da IA é na visão computacional e no processamento de imagens para inspeções. Drones equipados com câmeras de alta resolução e algoritmos de IA podem realizar inspeções visuais detalhadas em fuselagens, asas, rotores e outras estruturas de aeronaves (Shafiee, M., et al., 2021). Essa tecnologia identifica fissuras, corrosão, amassados, danos por impacto de pássaros ou outros corpos estranhos, ou anomalias externas com precisão e rapidez superiores às da inspeção manual. Os Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas estão integrados sinergicamente aos conceitos de Aviação 4.0¹⁰, que defendem a automação de procedimentos de manutenção e/ou inspeção dentro da estrutura da IoT.

Esses algoritmos são desenvolvidos a partir de grandes volumes de imagens de aeronaves, que contêm registros de falhas como trincas, corrosão, deformações, impactos causados por aves ou granizo, além de defeitos em parafusos e rebites. Com isso, a Inteligência Artificial pode identificar, classificar e, em certas situações, estimar

¹⁰ Aviação 4.0 é um conceito derivado da Indústria 4.0, que incorpora tecnologias digitais, automação e inteligência artificial aos processos aeronáuticos. Seu objetivo é aumentar a segurança, eficiência e confiabilidade por meio da digitalização de operações, manutenção preditiva, análise de dados em tempo real e integração entre sistemas aeronáuticos e logísticos (Kahraman e Aydin 2022).

a evolução dos danos ao analisar comparações temporais das imagens (Suvittawat, Nutchanon et al., 2025).

A utilização de IA e drones nas inspeções aeronáuticas traz ganhos significativos em segurança, reduzindo a exposição de técnicos a riscos. Além disso, agiliza o processo, diminuindo o tempo de inspeção e os custos. A padronização na coleta de dados garante maior precisão. A detecção de falhas sutis melhora a eficácia da manutenção preditiva (Rodriguez et al., 2024).

Apesar das vantagens, o pleno aproveitamento dos drones enfrenta desafios, como a necessidade de algoritmos robustos para processamento de imagem, a integração de dados de diferentes sensores e a garantia da qualidade dos dados em diversas condições. Além disso, a regulamentação e a superação das limitações de bateria são aspectos relevantes para a expansão dessa tecnologia.

A crescente sofisticação dos helicópteros gera muitos dados de voo e manutenção, tornando a IA indispensável para a análise. Ela otimiza a segurança, a eficiência e os custos ao identificar padrões e correlações que superam a capacidade humana, resultando em manutenção preditiva mais precisa, segura e eficiente. A colaboração entre a IA e especialistas humanos, embora demande validação e interpretação, aprimora as decisões informadas a partir de dados. Essa parceria entre a IA e o conhecimento humano é fundamental para o avanço da manutenção de helicópteros (Faizan, 2024).

Um exemplo de aplicação da IA é na análise de dados de vibração de componentes mecânicos dos helicópteros, como motores e caixas de transmissão. Algoritmos de aprendizado de máquina identificam anomalias sutis nas vibrações que métodos convencionais não detectam, sinalizando falhas incipientes, como desgaste, desalinhamento ou trincas.

Nesta aplicação, é necessário entender como os dados extraídos influenciam a identificação e a antecipação de falhas. A análise eficiente realizada por esses algoritmos depende do monitoramento contínuo dos ativos. Nesse contexto, a utilização integrada de Inteligência Artificial e sensores conectados via IoT permite a coleta automática e em tempo real das informações, dispensando a intervenção direta do profissional de manutenção.

Ao abordar aeronaves de asas rotativas, além da análise de seus sistemas mecânicos, a vibração da estrutura se torna imprescindível. Em voo, essas máquinas geram sinais complexos, dificultando a identificação de falhas. Por isso, o

processamento de algoritmos de IA é essencial para extrair padrões e detectar anomalias.

Conforme estudo da Research, Society and Development (2021), redes neurais artificiais classificaram regimes de voo a partir de sinais de vibrações em tempo real. Este método foi considerado eficaz. Os autores destacam:

A identificação de vibrações indesejáveis por técnicas de inteligência artificial, como Redes Neurais Artificiais (RNA), é uma ferramenta eficiente para o reconhecimento de padrões de falha dos sinais de vibração de máquinas. Máquinas rotativas utilizam várias técnicas de RNA para identificar padrões de falha¹¹(Oliveira Neto et al., 2021, p. 2, tradução própria).

A análise de vibração é amplamente empregada na detecção de falhas em sistemas mecânicos, como engrenagens. No setor aeronáutico, Dong (2018) desenvolveu uma Rede Neural Artificial (RNA) capaz de identificar parâmetros de voo relacionados à formação de gelo em helicópteros. Isso demonstra o potencial da IA na caracterização de condições críticas de operação.

A vibração em helicópteros aumenta os custos de manutenção e representa um risco à segurança operacional. A Agência Europeia de Segurança Aérea (EASA, 2020) e o CENIPA (2017) reconhecem falhas técnicas e de manutenção como causas relevantes de acidentes, responsáveis por cerca de 33% dos casos no Brasil.

Seguindo essa linha de raciocínio, podemos afirmar que a utilização da inteligência artificial contribui em amplos aspectos para operações com helicópteros (Oliveira Neto et al., 2021). Nesse contexto, a análise de vibrações é essencial para antecipar falhas, reduzindo riscos e otimizando a manutenção preventiva e preditiva.

Concluimos que a análise de vibração em helicópteros é essencial para monitorar a saúde funcional dos sistemas e da estrutura da aeronave. A análise é amplamente adotada na manutenção avançada. Essas análises, aprimoradas pela IA, facilitam o cálculo dos custos do ciclo de vida e apoiam a tomada de decisões. Ao substituir cronogramas predefinidos por manutenções baseadas na condição e no comportamento, a IA reduz falhas inesperadas, aumenta a confiabilidade e melhora a disponibilidade, diminuindo os custos operacionais e de manutenção.

¹¹ Tradução própria. Texto original. "The identification of undesirable vibrations by artificial intelligence techniques such as Artificial Neural Networks (ANN) is an efficient tool for malfunction pattern recognition of machine vibration signals. Rotating machinery uses several ANN techniques to identify failure patterns."

Em resumo, a IA está redefinindo a manutenção aeronáutica ao oferecer capacidades preditivas, otimização logística, aprimoramento de inspeções e suporte à decisão. Isso resulta em maior disponibilidade, segurança e eficiência operacional das frotas aéreas, um objetivo essencial para qualquer força militar moderna.

3.2 A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO TEATRO DE OPERAÇÕES

A aplicação da Inteligência Artificial no meio militar vai além da manutenção, abrangendo logística, comando e controle até apoio à decisão. Sua capacidade de analisar grandes volumes de dados em tempo real e automatizar processos complexos torna a IA essencial para melhorar a eficiência operacional, reduzir riscos ao pessoal e aumentar a eficácia das FA.

No campo da inteligência, vigilância e reconhecimento (IVR) militar, a IA é essencial para lidar com o grande volume de dados gerados por sensores de aeronaves, satélites, terrestres e do ciberespaço (Morgan et al., 2020). A IA se destaca na capacidade de analisar grandes volumes de informações para identificar padrões e correlações.

Algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente técnicas de *Deep Learning* (DL)¹² para análise de imagens e vídeos, podem identificar padrões, detectar atividades suspeitas, classificar veículos e alvos e extrair informações essenciais para a inteligência de combate em uma escala e velocidade inviáveis para analistas humanos.

O Project Maven do Departamento de Defesa dos EUA (DoD) é um exemplo que visa aplicar algoritmos de visão computacional e outras capacidades de IA para processar dados de IVR, especialmente vídeos em movimento, superando a capacidade humana de análise (Morgan et al., 2020).

A cibersegurança militar é outro campo onde a IA desempenha um papel defensivo e ofensivo crucial. Algoritmos de aprendizado de máquina podem detectar anomalias e ameaças cibernéticas em redes militares em tempo real, identificar

¹² O *Deep Learning* (DL): subárea da IA baseada em redes neurais artificiais com múltiplas camadas. Ela permite que sistemas computacionais aprendam representações complexas a partir de grandes volumes de dados, sendo particularmente eficaz na identificação de padrões em sinais, imagens e séries temporais, como os captados por sensores em aeronaves. (Achouch et al., 2022)

padrões de ataque complexos que evitam defesas tradicionais e prever novas vulnerabilidades e vetores de ataque.

A automação e a robótica, impulsionadas pela IA, estão remodelando as operações militares. Veículos não tripulados podem atuar em ambientes perigosos. Drones, veículos terrestres e submarinos autônomos podem realizar missões de IVR e combate. A capacidade da IA de atuar na defesa permite operar em áreas perigosas, reduzindo a exposição das tropas. Além disso, auxiliam na tomada de decisões ao processar grandes volumes de dados (Morgan et al., 2020).

Apesar dos benefícios da Inteligência Artificial em ambientes militares, seu uso indiscriminado gerou preocupações éticas. Segundo pesquisa de Morgan et al. (2020) divulgado pelo relatório da organização RAND Corporation, sobre aplicações militares da tecnologia, há receios de que máquinas possam tomar decisões letais sem supervisão humana, levantando questões sobre responsabilidade moral e dignidade da vida humana.

Além disso, sistemas de IA podem falhar ou agir de forma imprevisível, o que é crítico em cenários de combate complexos. Segundo Clarke (2019), a rápida expansão da IA supera a capacidade de regulação dos governos, gerando riscos à segurança, à justiça e à dignidade humana. Entre os principais pontos de atenção estão a falta de transparência nos algoritmos, a dificuldade de responsabilização em sistemas autônomos e o risco de decisões enviesadas e discriminatórias.

O autor defende um modelo de governança multissetorial, envolvendo instituições públicas, setor privado e sociedade civil. Além disso, ele defende a incorporação de princípios éticos no desenvolvimento das tecnologias (*"Ethical by Design"*)¹³, tais como explicabilidade, auditabilidade e controle humano significativo (Clarke, 2019).

A perspectiva de que a IA não é apenas uma ferramenta, mas uma força significativa, ressalta sua abrangência e capacidade de influenciar a doutrina militar. Isso impulsiona a necessidade de uma estratégia robusta e integrada em todas as dimensões da defesa.

Em suma, a IA revoluciona as operações militares. Ela impacta desde a manutenção preditiva e logística até inteligência, vigilância, cibersegurança e veículos

¹³ *Ethical by Design*: Integra considerações éticas, valores e princípios (como privacidade, justiça, transparência e responsabilidade) no desenvolvimento de sistemas e tecnologias das fases iniciais de concepção e *design*, em vez de abordá-las como um acréscimo posterior (Beard.; Longstaff, 2018).

autônomos. Destaca-se o uso de algoritmos para processar grandes volumes de dados em tempo real, antecipar falhas, identificar alvos, automatizar operações e otimizar missões, reduzindo riscos ao pessoal. Sua implementação no setor militar deve seguir rigorosas diretrizes éticas e mecanismos de controle humano.

3.3 SUSTENTAÇÃO LOGÍSTICA DE AERONAVES COM SUPORTE DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A logística é um pilar fundamental da estratégia militar, definida como "a arte prática de mover e suprir exércitos". Muitas vezes, sua complexidade é subestimada. Conforme enfatiza Van Creveld (1977) em seu influente trabalho:

Antes que um comandante possa sequer começar a pensar em manobrar ou dar batalha, em marchar para um lado e para o outro, em penetrar, envolver, cercar, aniquilar ou desgastar, em suma, em colocar em prática todo o arcabouço da estratégia, ele precisa - ou deve se certificar de sua capacidade de fornecer aos seus soldados aquelas 3.000 calorias por dia sem as quais eles muito em breve deixarão de ser úteis como soldados.¹⁴ (Van Creveld, 1977, p. 12, p. 2, tradução própria).

Durante cenários de conflitos, a logística de aviação determina a capacidade de uma força em projetar poder, sustentar operações prolongadas, reagir rapidamente a ameaças e assegurar a superioridade aérea. Em conflito, onde o tempo é crítico, os recursos são limitados e disputados, e as ameaças são constantes, a eficiência logística é um diferencial decisivo entre o sucesso e o fracasso de uma missão (Van Creveld, 1977). Nesse contexto, a Inteligência Artificial emerge como um catalisador para otimizar essa rede de suprimentos, manutenção, transporte e pessoal.

A cadeia de suprimentos é vital para a manutenção operacional em qualquer área, tornando-a mais ou menos competitiva. O uso da IA na otimização da gestão de estoque na logística da aviação civil demonstrou reduções de custos de 2,4% a 60% e diminuições nos níveis de estoque de 34% a 54%. Isso ilustra o potencial transformador da IA em ambientes logísticos complexos (Moghadasnian, 2025).

Em ambientes de guerra, a demanda por disponibilidade operacional de aeronaves atinge seu pico. Falhas não planejadas podem ter consequências severas,

¹⁴ Tradução própria. Texto original: "Before a commander can even start thinking of maneuvering or giving battle, of marching this way and that, of penetrating, enveloping, encircling, of annihilating or wearing down, in short of putting into practice the whole rigmarole of strategy, he has or ought - to make sure of his ability to supply his soldiers with those 3,000 calories a day without which they will very soon cease to be of any use as soldiers".

resultando em perdas e erros críticos, expondo homens a riscos inaceitáveis (Moubray, 1997). A manutenção preditiva, discutida anteriormente e impulsionada pela IA, torna-se ainda mais vital. Ela permite o monitoramento contínuo e em tempo real da "saúde" dos helicópteros navais e de outras aeronaves, prevendo com precisão quando e onde intervenções de manutenção serão necessárias.

Isso minimiza o tempo de inatividade não planejado, garantindo que o maior número de aeronaves esteja apto para a missão a qualquer momento. Além disso, permite que os recursos de manutenção (técnicos, peças, ferramentas) sejam alocados de forma otimizada, reduzindo o desperdício em um ambiente de escassez.

Além da manutenção, a IA otimiza o gerenciamento de estoques de peças de reposição em ambientes de conflito, um dos maiores desafios logísticos. Prever a demanda por componentes específicos em um cenário de guerra é complicado, pois as taxas de consumo e danos podem variar devido à intensidade do combate ou a condições ambientais extremas.

Algoritmos de aprendizado de máquina podem analisar dados em tempo real, superando limitações, incluindo informações de sensores de veículos, sistemas de controle, GPS e taxas de desgaste. Esse processo pode ajustar os níveis e a localização de peças, evitando a escassez em bases avançadas, onde o espaço é limitado e o reabastecimento é arriscado, demorado e perigoso (Reichsthaler et al., 2022). A precisão preditiva da IA, evidenciada na aviação civil com reduções de custos e estoques, minimiza o risco de missões abortadas pela falta de um componente crítico.

A otimização de rotas logísticas é outra contribuição significativa da IA. Em cenários de guerra, as rotas de transporte enfrentam ameaças inimigas, condições climáticas extremas e infraestrutura danificada. Sistemas de IA podem analisar dados em tempo real de inteligência, sensores meteorológicos e informações de tráfego para recomendar as mais seguras, rápidas e eficientes para suprimentos e pessoal. Isso reduz o risco de perdas logísticas e acelera o fluxo de recursos para a linha de frente, mantendo a capacidade de combate.

A logística autônoma também apresenta um enorme potencial. Veículos aéreos não tripulados (VANT) e veículos terrestres não tripulados (UGV), controlados por IA, podem entregar suprimentos em zonas de combate perigosas ou inacessíveis, minimizando a exposição de pessoal a riscos (Morgan et al., 2020). A capacidade desses sistemas de navegar autonomamente em ambientes complexos e dinâmicos,

tomando decisões em tempo real sobre rotas, obstáculos e desvios, representa um avanço crucial para o ressuprimento contínuo e seguro em cenários de guerra.

Em síntese, a aplicação da Inteligência Artificial na logística de aviação em cenários de guerra é essencial para garantir prontidão, eficiência e superioridade estratégica. A IA assegura que os meios aéreos operem com máxima disponibilidade e desempenho, mesmo em contextos críticos de combate, capacitando as forças a manter uma vantagem logística decisiva, ao tornar a manutenção preditiva, otimizar suprimentos e rotas e permitir soluções autônomas.

4 PROPOSTA DE MODELO PARA MANUTENÇÃO INTELIGENTE EM HELICÓPTEROS

A transição da manutenção tradicional para a manutenção inteligente, impulsionada pela Indústria 4.0 e Inteligência Artificial, representa um imperativo estratégico para as Forças Armadas modernas. No contexto de helicópteros militares em ambientes de ampla complexidade, a otimização da disponibilidade operacional e a redução de custos por meio de diagnósticos preditivos e prescritivos tornam-se fatores fundamentais para o êxito da missão.

A experiência pioneira de embarcações como o USS Fitzgerald na Marinha dos EUA, que utilizam IA para otimizar a manutenção de seus sistemas, demonstra o potencial transformador dessa tecnologia em ambientes militares, nesse caso específico no meio naval. Essa integração de sistemas representa uma tendência mais ampla de adoção de IA na defesa, onde automação, análise de dados e aprendizado de máquina serão relevantes (Choi, 2025).

Paralelamente, no cenário nacional, a Força Aérea Brasileira (FAB) reconhece os benefícios da IA e aprova a implementação do seu primeiro Laboratório de Inteligência Artificial para otimizar sistemas de TI, focando na tomada de decisões, manutenção de aeronaves, simulação de cenários e otimização logística (Brasil, 2024).

Um modelo de manutenção alinhado com o exemplo do USS Fitzgerald deve ser fundamentado em tecnologias da Indústria 4.0, integrando sensores, aprendizado de máquinas e análise de dados ao ciclo de manutenção aeronáutica, garantindo alta disponibilidade, confiabilidade e capacidade de resposta das aeronaves em qualquer ambiente, considerando as especificidades operacionais, logísticas e tecnológicas dos cenários de conflito.

Esse modelo deve se basear no uso de sistemas HUMS e *Digital Twins*¹⁵, que monitoram helicópteros e simulam seu comportamento em tempo real (Romero; Summers; Cronkhite, 1996). A IA analisa os dados coletados, identificando falhas

¹⁵ *Digital Twins* (gêmeos digitais): são representações virtuais de sistemas físicos, que reproduzem em tempo real seu comportamento com base em dados operacionais. Essa tecnologia permite simular cenários, prever falhas e otimizar a manutenção, sendo amplamente aplicada na aviação e na indústria de defesa para aumentar a confiabilidade e a tomada de decisão estratégica. (Achouch et al., 2022)

potenciais e projetando a vida útil dos componentes, permitindo ações preditivas com mais precisão e segurança (Soori, Arezoo, Dastres, 2023).

Além disso, o modelo deve prever a integração entre manutenção e logística, antecipando demandas e otimizando recursos, mesmo em cenários hostis. Para garantir a continuidade das operações, são propostos mecanismos robustos de segurança cibernética, como criptografia e redundância de dados, essenciais para proteger sistemas digitais em ambientes militares complexos e ameaçados.

Este capítulo propõe um modelo conceitual para implementar um sistema de manutenção inteligente em helicópteros de guerra. Ele detalha seus componentes, arquitetura e desafios na aplicação em operações militares. A relevância do modelo reside na capacidade de transformar dados brutos de sensores em *insights* acionáveis, permitindo que operadores antecipem falhas, otimizem o planejamento de recursos e garantam que as aeronaves estejam prontas para suas missões.

4.1 FUNDAMENTOS DE UM MODELO INTELIGENTE

Um modelo de manutenção inteligente para helicópteros integra múltiplas tecnologias e processos para criar um ecossistema de dados e decisões. O objetivo principal é avançar da manutenção preditiva para a prescritiva, onde não apenas se prevê uma falha, mas também se recomenda a ação mais eficaz para mitigá-la.

Essa abordagem busca resolver falhas comuns na manutenção de aeronaves, como dados técnicos incompletos, substituições de componentes não programadas e tempo prolongado para solucionar panes. O modelo propõe a coleta integrada de dados em tempo real e históricos, oriundos de sensores embarcados, registros de manutenção, inspeções e condições ambientais. A IoT viabiliza essa conectividade, permitindo análises mais precisas e intervenções proativas (Briatore; Braggio, 2024).

A vasta quantidade de dados gerada exige uma infraestrutura capaz de armazenar, processar e gerenciar *Big Data* eficientemente. Isso inclui *Cloud Computing* ou *Edge Computing*, que garantem segurança, a escalabilidade¹⁶ e o acesso rápido às informações, mesmo em ambientes com largura de banda limitada (NSCAI, 2021).

¹⁶ Escalabilidade é a capacidade de um sistema, rede ou infraestrutura digital de ampliar seu desempenho e recursos conforme o aumento da demanda, sem comprometer sua funcionalidade.

O coração do modelo reside na análise avançada e na Inteligência Artificial, onde algoritmos, principalmente de *Machine Learning* e *Deep Learning*, são aplicados para diagnóstico (identificar a causa raiz de um problema), prognóstico (prever a vida útil remanescente de um componente ou a probabilidade de falha), manutenção preditiva (acionar alertas e recomendações) e prescritiva (sugerir ações otimizadas considerando custos, tempo e recursos) (Agustian; Pratama, 2024).

Ramos da IA como sistemas especialistas¹⁷, visão computacional¹⁸ e Processamento de Linguagem Natural (PLN)¹⁹ também são cruciais. Essa integração de tecnologias de IA tem atraído interesse crescente do setor aeronáutico, resultando em benefícios como confiança do operador, economia de tempo, segurança, redução de custos, melhor tomada de decisões, resolução de problemas complexos e garantia de otimização e eficiência (NSCAI, 2021).

Embora a IA forneça *insights* poderosos, a decisão final para intervenções de manutenção em um ambiente militar deve permanecer com o ser humano. Assim, a interface e a tomada de decisão *Human-in-the-Loop*²⁰ são essenciais. Elas permitem que técnicos e gestores logísticos visualizem as análises da IA, compreendam as recomendações e tomem decisões informadas rapidamente (Amershi et al., 2019).

O modelo se completa com um ciclo de feedback contínuo, onde as informações sobre as intervenções realizadas, o sucesso dos reparos e o desempenho pós-intervenção são realimentadas no sistema, permitindo que os algoritmos de IA aprimorem seus modelos preditivos e prescritivos ao longo do tempo, tornando o sistema cada vez mais preciso e eficiente.

4.2 ARQUITETURA PROPOSTA PARA HELICÓPTEROS MILITARES

A arquitetura de um sistema de manutenção inteligente para helicópteros militares deve ser robusta, segura e adaptável às especificidades do ambiente,

¹⁷ Sistemas Especialistas são programas baseados em regras que imitam a lógica de especialistas humanos, utilizando uma base de conhecimento.

¹⁸ Visão Computacional (Computer Vision): área da IA que permite a análise de imagens e vídeos, para que máquinas reconheçam, interpretem e extraiam informações visuais semelhante à visão humana.

¹⁹ Processamento de Linguagem Natural (PLN): campo da IA que estuda a interação entre computadores e linguagem humana, permitindo que sistemas compreendam, interpretem e respondam em linguagem natural. (Achouch et al., 2022)

²⁰ *Human-in-the-Loop*: Sistemas de IA ou automação em que o ser humano participa ativamente do processo de decisão, supervisionando, validando ou intervindo em ações geradas por algoritmos para garantir segurança, ética e controle em aplicações críticas (Amershi et al., 2019).

principalmente em ambiente marítimo. A camada de coleta de dados na aeronave envolve a instalação de uma rede de sensores inteligentes nos componentes críticos do helicóptero, com Unidades de Aquisição de Dados Embarcadas (*Modular Data Acquisition Units* - MDAU)²¹, que pré-processam as informações. A conectividade de bordo utiliza redes seguras para transferir dados de fontes variadas, como sensores, registros de voo e histórico de falhas (Romero; Summers; Cronkhite, 1996).

A camada de comunicação utiliza *gateways*²² seguros com transmissões criptografadas, enquanto o *edge computing* permite o processamento local dos dados em ambientes com conectividade limitada. Uma arquitetura baseada em redes 6G fornece conectividade de alta velocidade e baixa latência entre aeronaves, sistemas terrestres e equipes de manutenção, permitindo o envio em tempo real de diagnósticos, alertas e vídeos.

Já a camada de processamento e análise, geralmente em nuvem ou *data center*, embute plataformas de *Big Data* e módulos de IA, que aplicam algoritmos como *Long Short-Term Memory (LSTM)*²³ para predição e *Convolutional Neural Network (CNN)*²⁴ para classificação e detecção, otimizando a tomada de decisão na manutenção aeronáutica (Igor Kabashkin, 2024). Durante o processamento e análise, pode-se criar um *digital twin* para cada componente crítico. Essa abordagem, empregada com sucesso em navios como o USS Fitzgerald, permite simular cenários de falhas e decisões sem riscos à aeronave física (Choi, 2025).

A camada de interface e ação incorpora *dashboards*²⁵ visuais para mostrar o estado das aeronaves, previsões de falhas e recomendações de manutenção. Ela integra notificações automáticas e ligação direta com sistemas logísticos para automatizar as ordens de serviço. Além disso, a Realidade Aumentada (RA) orienta os profissionais, sobrepondo instruções visuais aos componentes, reduzindo erros e facilitando reparos (Panigrahi, 2024).

²¹ Unidades de Aquisição de Dados Embarcadas (*Modular Data Acquisition Units* - MDAU): Módulos em aeronaves que coletam dados de múltiplos sensores em tempo real, usados em HUMS (Romero; Summers; Cronkhite, 1996).

²² Dispositivo em redes de comunicação que atua como ponto de conexão e tradutor de dados entre redes com protocolos distintos, facilitando o fluxo de informações.

²³ *LSTM (Long Short-Term Memory)*: tipo de rede neural projetada para aprender sequências temporais e detectar padrões ao longo do tempo (Igor Kabashkin, 2024).

²⁴ *CNN (Convolutional Neural Network)* é uma arquitetura de rede neural profunda especializada no processamento de imagens, amplamente utilizada em manutenção aeronáutica para identificação automatizada de falhas visuais em componentes mecânicos e estruturais (Achouch et al., 2022).

²⁵ *Dashboard*: Interface gráfica que apresenta informações visuais e de fácil compreensão, permitindo o monitoramento do desempenho, a identificação de tendências e o suporte à tomada de decisão.

4.3 DESAFIOS E FATORES CRÍTICOS PARA IMPLEMENTAÇÃO EM CENÁRIOS DE CONFLITO

A implementação de um modelo de manutenção inteligente em um ambiente militar, especialmente em cenários de conflito, apresenta desafios únicos que precisam ser cuidadosamente gerenciados. Estes elementos-chave para o êxito determinam o sucesso ou fracasso da iniciativa.

A segurança cibernética é primordial, visto que sistemas de IA e dados logísticos são alvos primários de ataques. A proteção de dados sensíveis, a integridade dos algoritmos e a resiliência da infraestrutura de comunicação contra invasões, manipulações ou negação de serviço são essenciais.

Qualquer falha na integridade ou proteção dos dados pode resultar em decisões de manutenção equivocadas, indisponibilidade ou comprometimento de informações sensíveis. Esse risco é maior em ambientes militares, onde cada falha logística tem implicações estratégicas. O projeto de integração de IA no USS Fitzgerald evidenciou essas preocupações, destacando os protocolos de segurança cibernética, criptografia de ponta a ponta e supervisão humana, garantindo a confiabilidade dos sistemas (Choi, 2025).

A qualidade e disponibilidade de dados são desafios críticos, pois a eficácia da IA depende de um grande volume de dados consistentes. Em zonas de conflito, essa conectividade pode sofrer interrupções devido a ataques físicos e cibernéticos à infraestrutura de telecomunicações. Durante a guerra na Ucrânia, regiões como Kharkiv e Mariupol sofreram quedas de internet que duraram horas ou dias, evidenciando a importância de soluções offline e algoritmos adaptados a dados limitados (Phokeer, 2023).

Sob essa perspectiva, a limitação de conectividade e largura de banda em teatros de operações remotos exige soluções criativas e autônomas, capazes de operar *offline*. O desenvolvimento de algoritmos robustos, aptos a processar dados escassos ou degradados, é um desafio significativo. Para isso, é de extrema importância investir em tecnologias de comunicação via satélite, com infraestrutura modular, portátil e de rápida mobilização e manuseio.

A capacitação e adaptação de pessoal são obstáculos significativos. Isso demanda treinamento intensivo para operar sistemas de IA. Isso exige mais do que habilidades técnicas: envolve construir uma força apta a interpretar, adaptar e manter

tecnologias, em diferentes níveis de competências. A formação requer não apenas programadores, mas técnicos para a manutenção contínua dos sistemas e decisores que entendam os limites e riscos associados à IA.

A Força Aérea Brasileira, por exemplo, reconhece que existe a necessidade de uma qualificação direcionada para seus profissionais. A instituição descreve:

[..]esta iniciativa será fundamental para o desenvolvimento de expertise interna, para a formação de especialistas e para o fortalecimento de parcerias estratégicas, promovendo eficiência e inovação contínuas (Brasil, 2024)

De forma complementar, o art. sobre o USS Fitzgerald aponta a necessidade de treinamento adequado da tripulação para interpretar as recomendações geradas por IA. No art. é enfatizado:

Marinheiros devem ser adequadamente treinados para interpretar as recomendações geradas por IA e integrá-las efetivamente nos fluxos de trabalho de manutenção (Choi, 2025, p. 13)

A interoperabilidade e integração com sistemas legados representam um desafio complexo e custoso, dada a vasta gama de sistemas nas FA. A implementação desigual de tecnologias de inteligência artificial entre forças armadas e aliados pode comprometer a interoperabilidade. Sistemas digitais distintos ou não compatíveis geram obstáculos e riscos táticos e estratégicos em operações conjuntas.

Os custos de implementação e manutenção de sistemas de IA podem ser altos, devido aos investimentos iniciais e contínuos, exigindo justificação do custo-benefício. Além dos sistemas, a necessidade de substituir as plataformas desconectadas a um ecossistema digital moderno encarece ainda mais o processo como um todo (NSCAI, 2021). As restrições orçamentárias e a competição de prioridades das forças militares tornam a alocação de recursos um desafio adicional.

No entanto, os potenciais benefícios da IA podem justificar e, em muitos casos, superar esses custos. Embora o uso da IA demande alto investimento, os potenciais ganhos em eficiência, segurança, manutenção, logística, treinamento e a capacidade de realizar tarefas perigosas ou repetitivas justificam sua implementação, desde que haja uma avaliação contínua desse custo-benefício.

Finalmente, as considerações éticas e jurídicas sobre o uso da IA em decisões de manutenção e logística, que afetam a vida humana, mesmo que indiretamente, levantam a necessidade de supervisão humana significativa (*Meaningful Human*

Control – MHC)²⁶, garantindo que as máquinas apoiem, e não substituam, o julgamento humano (Morgan et. al, 2020).

Embora não diretamente letais, falhas em sistemas de manutenção, causadas por dados imprecisos ou ataques cibernéticos, poderiam causar acidentes com perda de vidas. A confiança excessiva (*Automation Bias*²⁷) em diagnósticos de IA pode levar a erros graves se os operadores não questionarem as saídas do sistema. A responsabilidade por esses erros é uma preocupação ética e jurídica significativa, especialmente em sistemas complexos e interconectados (Morgan et al., 2020).

De forma resumida, esse modelo de manutenção proposto deve incluir fundamentos bem sedimentados, como:

- a) coleta de dados abrangente: o ponto de partida é a aquisição de dados em tempo real e históricos, oriundos de múltiplas fontes;
- b) infraestrutura de dados robusta: a vasta quantidade de dados gerada exige uma infraestrutura capaz de armazenar, processar e gerenciar *Big Data* de forma eficiente;
- c) análise avançada e inteligência artificial: este é o coração do modelo. Algoritmos de IA, principalmente de aprendizado de máquina e aprendizado profundo;
- d) interface e tomada de decisão *human-in-the-loop*: embora a IA forneça *insights* poderosos, a decisão final para intervenções de manutenção em um ambiente militar deve permanecer com o ser humano; e
- e) ciclo de *feedback* contínuo: o modelo é um sistema de aprendizado contínuo. As informações sobre as intervenções de manutenção realizadas, o sucesso dos reparos e o desempenho dos componentes após a intervenção são realimentadas no sistema.

Além disso sua arquitetura deve conter as seguintes abordagens:

- a) camada de coleta de dados: sensores inteligentes, unidade de aquisição de dados e conectividade a bordo dos meios;

²⁶ *Meaningful Human Control* (MHC): Exigência de que sistemas autônomos letais operem sob supervisão humana significativa, garantindo que decisões críticas (uso da força) não sejam delegadas a máquinas, preservando a responsabilidade moral e jurídica conforme o DIH (Morgan et. al, 2020).

²⁷ *Automation bias*: tendência humana de confiar excessivamente em decisões ou sugestões geradas por sistemas automatizados, mesmo quando estas podem estar incorretas (Hoffman, 2024)

- b) camada de comunicação e transmissão: *gateways* de dados, comunicação criptografadas e armazenamento temporário;
- c) camada de processamento e análise: plataforma de *Big Data*, módulos de inteligência artificial e *digital twin*; e
- d) camada de interface e operação: painéis de controle e *dashboards*, sistemas de alerta e notificações, integração com sistemas logísticos e RA.

Em síntese, a proposta de um modelo de manutenção inteligente para helicópteros militares é uma alternativa promissora para aumentar a eficiência logística e a disponibilidade operacional. No entanto, sua implementação requer um planejamento detalhado, considerando as capacidades da IA e os desafios do ambiente militar. A experiência internacional mostra que superar esses obstáculos é fundamental para converter o potencial da IA em vantagem real para as Forças Armadas do futuro.

5 MANUTENÇÃO DE HELICÓPTEROS MILITARES EM CENÁRIOS DE CONFLITO

A efetividade do emprego de meios militares em conflitos armados depende intrinsecamente de sua prontidão operacional, um fator diretamente ligado à confiabilidade do sistema de manutenção. Este capítulo analisará a manutenção de helicópteros em cenários de combate, usando exemplos de conflitos onde o emprego dessas aeronaves foi preponderante.

O capítulo explorará as abordagens da Guerra do Vietnã, da Guerra do Afeganistão e da Guerra das Malvinas. Cada exemplo de manutenção no campo de batalha exigiu uma abordagem adaptativa, fruto das peculiaridades e desafios logísticos impostos em cada guerra. Dois desses conflitos serão analisados, focando nos aprendizados e evoluções da manutenção, e o outro irá abordar uma perspectiva naval na manutenção de helicópteros de combate embarcados em navios de guerra.

5.1 A EVOLUÇÃO NA MANUTENÇÃO DE HELICÓPTEROS NAS GUERRAS DO VIETNÃ E AFEGANISTÃO

A primeira análise será da Guerra do Vietnã (1955-1975), o primeiro grande conflito com o helicóptero empregado em larga escala como meio de transporte, apoio tático, evacuação médica e inserção/extração de tropas. Foram utilizados mais de 15 modelos, destacando o UH-1 Iroquois, popularmente conhecido como "*Huey*". Essas aeronaves tornaram-se o símbolo da mobilidade aérea do Exército dos EUA. No entanto, o uso extensivo dos helicópteros em ambiente hostil e com alta carga operacional trouxe desafios logísticos e de manutenção que exigiram adaptações, inovações e respostas rápidas das unidades de apoio (Tolson, 1973).

A doutrina americana de mobilidade aérea foi testada no Vietnã e, com ela, a capacidade de sustentar uma frota de milhares de helicópteros em combate contínuo. Estima-se que mais de 12.000 helicópteros tenham sido empregados no conflito, com uma taxa de perda de aproximadamente 43% (Boyne, 2011). Entre os fatores que mais contribuíram para as falhas e perdas, destacam-se altas taxas de uso, clima hostil, ambientes agressivos e ataques inimigos.

Para sustentar a grande quantidade de meios empregados, a manutenção era organizada em escalões. Os dois primeiros eram realizados em campo e os demais

em instalações de retaguarda. Estabeleceram rotinas rigorosas de inspeção e prevenção, como as inspeções pré e pós-voo, manutenção corretiva de campo e um programa de manutenção chamado AIMI (*Aircraft Intensively Managed Items*) (Heiser, 1974).

Vale destacar que o programa AIMI foi criado durante a Guerra do Vietnã pelo Exército dos EUA para garantir maior disponibilidade dos helicópteros. O foco era no gerenciamento intensivo de itens críticos, como motores, rotores e sistemas de transmissão, permitindo rápida reposição por canais logísticos aéreos prioritários. As unidades de aviação enviavam relatórios sobre peças em desgaste ou falta, identificadas por códigos logísticos que determinavam prioridades. Havia unidades de manutenção avançadas próximas às áreas de combate (Heiser, 1974).

Essa iniciativa reduziu significativamente o tempo de aeronaves indisponíveis e introduziu elementos embrionários de manutenção preditiva, com base na identificação de falhas recorrentes em relatórios de campo. Podemos identificar que essas evoluções e soluções na manutenção tornaram-se pilares doutrinários que influenciaram o desenvolvimento de conceitos como a MBC com foco na integração entre operação, logística e tecnologia (US NAVY, 2024).

A escassez de infraestrutura no Vietnã foi suprida com oficinas móveis, bases flutuantes e depósitos intermediários. A doutrina de *Closed Loop Support*²⁸, permitiu resposta ágil a falhas recorrentes. Apesar disso, a manutenção enfrentou desafios como desgaste excessivo, danos por combate e falta de peças e pessoal qualificado. A guerra impulsionou mudanças duradouras, reforçando a importância de uma logística integrada e da manutenção preditiva (Boyne, 2011).

O segundo conflito analisado será a Guerra do Afeganistão (2001-2021), que exigiu o uso intensivo de helicópteros como UH-60 *Black Hawk*, CH-47 *Chinook*, AH-64 *Apache* e OH-58 *Kiowa*, que acumularam centenas de milhares de horas em operação. Eles demandaram rigorosos protocolos de manutenção e revisão ao término de cada ciclo operacional (Rusling, 2009). As condições ambientais do Afeganistão, como calor intenso, poeira fina e grandes altitudes, comprometeram o desempenho e a durabilidade dos helicópteros do Exército americano.

²⁸ *Closed Loop Support* : modelo que utiliza dados operacionais e de manutenção em tempo real para retroalimentar decisões, melhorando a eficiência e a disponibilidade durante todo ciclo de vida (Wright, 2022).

A presença constante de partículas no ar contribuiu para falhas prematuras. De acordo com Rusling (2009), publicado na *National Defense Magazine*, a areia, por ser muito fina e abrasiva, foi um dos maiores problemas enfrentados, pois penetrava em grandes componentes, como os motores, mesmo com filtros, causando corrosão e acidentes. Também foram observadas erosões nas pás e assoalhos das aeronaves. Somado a isso, a infraestrutura limitada das bases avançadas obrigava equipes a improvisar soluções em campo. A alta intensidade das missões reduzia o tempo disponível para revisões mais profundas, priorizando reparos imediatos.

Para contornar tais limitações, os helicópteros do Exército dos EUA criaram o programa "reinicialização" após operarem no Afeganistão. Nesse programa, as aeronaves passavam por desmontagens completas e inspeções minuciosas antes de voltar para o teatro de operações. Esse processo visava restaurar o desempenho original e identificar danos não detectados. Segundo dados, 70% das aeronaves que passaram pelo programa tiveram pelo menos um reparo não detectado durante a manutenção em campo de batalha, revelando danos ocultos e melhorias nos ciclos de manutenção (Rusling, 2009).

Durante a manutenção nos centros de reparo em solo americano, foram incorporadas melhorias em sistemas e materiais, além da atualização de componentes críticos. O modelo tradicional de manutenções programadas foi progressivamente substituído por abordagens baseadas na condição real dos equipamentos, exigindo a adoção de sensores especializados. Nesse contexto, o exército americano ampliou o uso do HUMS, até então pouco explorado (Andersson, 2011).

Esses sensores embarcados passaram a coletar dados em tempo real, identificando padrões anômalos e emitindo alertas antes de falhas críticas. Como resultado, o tempo de diagnóstico foi reduzido e tornou-se possível adotar ações preditivas fundamentadas em dados confiáveis. As taxas de disponibilidade das aeronaves aumentaram substancialmente e houve queda nos acidentes classificados como mais graves. Além disso, o HUMS permitiu agilidade na tomada de decisão, pois os próprios pilotos recebiam, em tempo real, alertas no cockpit (Andersson, 2011).

As experiências vivenciadas nas guerras do Vietnã e do Afeganistão mostram que a eficácia da manutenção de helicópteros em cenários de conflito está diretamente associada à capacidade de adaptação logística, uso inteligente de dados e incorporação de tecnologias emergentes.

Enquanto o Vietnã revelou a importância de estruturas logísticas flexíveis, adaptáveis à realidade de combate, acumulando experiências que geraram bases para o desenvolvimento de conceitos modernos como MBC e PdM, pilares da manutenção inteligente, o Afeganistão reforçou a importância da manutenção baseada em condição, como o HUMS, e da capacitação técnica contínua. Esses aprendizados contribuíram para a evolução de modelos mais eficientes, capazes de responder rapidamente às exigências operacionais do combate moderno.

5.2 MANUTENÇÃO DE HELICÓPTEROS NAS MALVINAS E O POTENCIAL DO USO DA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

A Guerra das Malvinas pode ser considerada um estudo de caso emblemático. O conflito, deflagrado pela invasão argentina das Ilhas Malvinas em abril de 1982, desencadeou uma rápida e decisiva resposta do Reino Unido, culminando em uma campanha naval e aérea no Atlântico Sul. Em pouco tempo, as Forças Armadas Britânicas, a milhares de km de suas bases, travaram uma guerra para retomar o território, resultando na rendição argentina (Freedman, 2005).

Um dos aspectos mais desafiadores para o Reino Unido durante este conflito foi a imensa dificuldade logística imposta pela grande distância geográfica das Ilhas Malvinas. As ilhas, situadas a aproximadamente 13.000 km de sua capital, no Atlântico Sul, representavam um isolamento geográfico que transformou a sustentação da Força-Tarefa (FT) em uma atribuição de proporções significativas. A longa linha de suprimento e a falta de bases avançadas no Atlântico Sul exacerbaram os desafios logísticos de reabastecimento e peças para os meios navais e aéreos britânicos.

A distância e o ambiente inóspito testaram severamente a capacidade logística britânica. Ela mobilizou uma vasta gama de navios e aeronaves para apoiar a força expedicionária. Manter qualquer equipamento sob essas condições já seria um desafio. Mas para os helicópteros navais, operando de convés de navios em mares agitados e sob ameaça inimiga, as complexidades se multiplicavam (Privratsky, 2014).

Nesse cenário de complexidade logística e operacional, os helicópteros emergiram como ativos indispensáveis para ambos os beligerantes, desempenhando funções vitais, apesar das restrições e ameaças. O Reino Unido mobilizou uma frota considerável pertencente à Royal Navy (RN), Exército Britânico e Royal Air Force (RAF). Modelos como o Sea King, Wessex e Lynx foram empregados em missões de

transporte e logística, guerra antissubmarino (ASW), busca e salvamento (SAR), reconhecimento e ataque (Middlebrook, 1982).

A Argentina empregou uma quantidade menor de helicópteros. Modelos como Puma, Bell UH-1H e Alouette foram utilizados ao longo da campanha. Apesar da proximidade com bases continentais, seu uso ficou focado em apoio logístico e movimentação de tropas dentro do arquipélago (Middlebrook, 1982). A diferença em efetivos, capacidades e a doutrina de emprego dos aparelhos influenciaram diretamente o curso das operações e os desafios de manutenção enfrentados por cada lado neste conflito.

Durante a Guerra das Malvinas, a manutenção dos helicópteros representou um dos maiores desafios logísticos e operacionais para a Força-Tarefa Britânica. A sustentação dessas aeronaves exigiu resiliência e capacidade de improvisação, pois operavam a milhares de quilômetros de suas bases, em um ambiente marítimo inóspito, com clima adverso e recursos limitados (Privratsky, 2014). A exposição constante ao ar salino, às vibrações das embarcações e às manobras bruscas em condições de voo extremas acelerou o desgaste dos componentes, exigindo inspeções e reparos frequentes.

A escassez de espaço nos navios impunha limitações para manutenções complexas ou armazenamento de grandes estoques de sobressalentes. Equipes de manutenção, muitas vezes reduzidas e sob intenso estresse, precisavam realizar reparos em condições adversas, trabalhando em convés de voo expostos às intempéries e ao frio intenso, ou em pequenos hangares improvisados. A cadeia de suprimentos, vulnerável, dificultava a reposição de componentes essenciais, forçando as equipes a depender da canibalização de peças de aeronaves danificadas ou inoperantes para manter outras voando (Brown, 1987).

Para as forças argentinas, os desafios de manutenção dos helicópteros não eram menos significativos, embora a distância das bases continentais fosse menor, mas de natureza distinta. A manutenção argentina enfrentava problemas relacionados à disponibilidade de peças de reposição para equipamentos de diversas origens e a capacidade de realizar reparos complexos sob o risco de ataques aéreos britânicos. A superioridade aérea britânica limitava a liberdade de movimento e o tempo disponível para intervenções de manutenção nas ilhas, forçando as equipes a operar sob pressão e com recursos, muitas vezes, improvisados. (Privratsky, 2014)

A principal diferença no apoio logístico para manutenção residia na natureza da operação. Enquanto o Reino Unido sustentava uma força expedicionária a uma distância intercontinental, com a manutenção primariamente embarcada e dependente de uma longa e vulnerável linha de suprimentos marítima, a Argentina, apesar de mais próxima de suas bases, tinha suas operações nas ilhas severamente constrangidas pela ameaça aérea e naval britânica.

A análise da manutenção de helicópteros na Guerra das Malvinas revela que muitos dos desafios enfrentados em 1982 poderiam ser substancialmente mitigados ou mesmo superados pela aplicação de um modelo de manutenção inteligente, conforme proposto no Capítulo 4.

A capacidade de prever falhas em componentes críticos, uma promessa da IA na manutenção, seria revolucionária com sensores e algoritmos fornecendo diagnósticos e prognósticos da vida útil de componentes. Isso permitiria ações proativas na alocação de peças e programação de reparos. Essa inteligência minimizaria a canibalização e a dependência de cadeias de suprimentos vulneráveis, otimizando a reposição de sobressalentes.

Além disso, ferramentas de IA e RA poderiam ter auxiliado as equipes de manutenção em reparos complexos a bordo de navios, compensando a reduzida mão de obra e condições inadequadas de trabalho. A análise de *Big Data*, impulsionada por IA, teria permitido uma visão em tempo real da "saúde" da frota de helicópteros de ambos os beligerantes, facilitando decisões baseadas em dados sobre emprego operacional e flexibilizando estratégias militares.

A principal diferença entre a manutenção de 1982 e a atual é a digitalização e a automação inteligente. Na Guerra das Malvinas, a manutenção era predominantemente corretiva ou preventiva, baseada em cronogramas, com inspeções manuais, registros físicos limitados e forte dependência da engenhosidade e experiência humana. Os processos eram reativos a falhas ou baseados em ciclos fixos, resultando em tempos de inatividade inesperados e altos custos logísticos.

Os conflitos contemporâneos, como as operações no Iraque e Afeganistão ou, mais recentemente, o conflito na Ucrânia, demonstram uma crescente adoção de sistemas de manutenção preditiva avançada e logística otimizada por IA. As FA contemporâneas usam redes de sensores, coleta e análise de *Big Data* em tempo real, *digital twin* para simulação e monitoramento contínuo, e IA para diagnóstico e prognóstico. Essa evolução representa uma transformação de uma manutenção

reativa e baseada em intervenções manuais para um paradigma proativo, preditivo e prescritivo, impulsionado pela inteligência de dados.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo investigou a manutenção inteligente de helicópteros militares, focando na aplicação da Indústria 4.0 e da Inteligência Artificial (IA) em cenários de conflito. Esta pesquisa reafirmou a necessidade da transição de paradigmas de manutenção tradicionais para abordagens proativas e preditivas em um ambiente estratégico que exige alta prontidão operacional. Essas abordagens são fundamentais para a otimização do aparelhamento e da sustentação dos meios em combate.

Foi estabelecido, ao longo do trabalho, um sólido arcabouço teórico, detalhando a evolução da manutenção (do corretivo ao preditivo e prescritivo) e os pilares da Indústria 4.0, como IoT, *Big Data* e IA, que possibilitam o monitoramento em tempo real e a antecipação de falhas. A IA foi explorada em suas diversas aplicações, tanto na manutenção aeronáutica (predição de falhas, otimização da cadeia de suprimentos, inspeções visuais e gestão do conhecimento) quanto no contexto militar mais amplo (inteligência, logística, automação e cibersegurança). Essa análise demonstrou o potencial da IA em transformar a logística em cenários de guerra, garantindo maior disponibilidade e resiliência.

Isto posto, dessas análises poderemos chegar a algumas conclusões, apoiadas a evidências, e assim identificar a resposta do questionamento central: Como a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 e da Inteligência Artificial na manutenção de helicópteros militares poderia impactar a disponibilidade operacional das aeronaves em cenários de conflito?

Durante a pesquisa, foi apresentado um modelo conceitual de manutenção inteligente para helicópteros militares. Esse modelo, que visa aprimorar o diagnóstico e prognóstico de componentes, otimizar reparos e alocação de recursos, é baseado em coleta de dados abrangente, infraestrutura robusta, análise avançada por IA e uma interface *Human-in-the-Loop*.

O modelo se inspira em iniciativas como a do USS Fitzgerald e da Força Aérea Brasileira. Contudo, foram reconhecidos desafios críticos para a implementação em ambientes de conflito, como segurança cibernética, qualidade dos dados, conectividade limitada, capacitação de pessoal e considerações éticas.

O estudo das Guerras do Vietnã, do Afeganistão e das Malvinas demonstrou as severas limitações da manutenção tradicional frente a desafios logísticos e

operacionais. Entretanto, as adversidades impostas por esses conflitos impulsionaram o desenvolvimento de soluções técnicas pioneiras e a evolução de modelos que, posteriormente, formaram as bases para a manutenção inteligente. Essa capacidade de adaptação e inovação, forjada em combate, aliada aos avanços tecnológicos, culminou no paradigma atual, dotado de capacidades preditivas e de otimização logística.

No contexto de conflitos passados, a aplicação desse aprimoramento na manutenção teria o potencial de mitigar as dificuldades operacionais das frotas de helicópteros, elevando sua disponibilidade de voo. Essa capacidade reflete a transformação da manutenção militar atual, que, impulsionada pela digitalização e inteligência de dados, evoluiu de uma concepção reativo e manual para modelos proativos, preditivos e prescritivos.

Este trabalho contribui, em última análise, ao oferecer um roteiro teórico-conceitual para a implementação da manutenção inteligente em helicópteros militares. Ele evidencia seu papel estratégico na garantia da prontidão operacional e na otimização de recursos em cenários de batalha. As implicações para a Marinha do Brasil e outras forças são claras: a adoção progressiva da IA é um passo essencial para uma gestão de ativos mais eficiente, segura e resiliente.

Ainda que a validação empírica do modelo e a transposição dos desafios de implementação demandem investigações futuras e vultosos investimentos, o potencial da IA para impulsionar a capacidade logística e operacional militar é incontestável. Isso configura um salto qualitativo essencial para a defesa nacional de estados modernos que buscam proeminência no cenário global.

Desse modo, a questão principal desse estudo foi respondida completamente. Utilizando fontes atuais e informações do passado, foi possível fundamentar as teorias e a evolução da manutenção, culminando nas tecnologias da Indústria 4.0 e na IA, que de acordo com o trabalho podem aprimorar a manutenção de helicópteros militares em ambientes de combate.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. **NBR - 5462, Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

ACHOUCH, Mounia et al. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. **Applied Sciences**, Basel, v. 12, art. 8081, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12168081>.

AGUSTIAN, Erna Shevilia; PRATAMA, Zastra Alfarezi. Artificial Intelligence Application on Aircraft Maintenance: A Systematic Literature Review. **EAI Endorsed Transactions on Internet of Things**, [S.l.], v. 10, art. 76, 2024. DOI: 10.4108/eetiot.6938

ANDERSSON, Jennifer (Sp.). **HUMS permite manutenção mais rápida para equipes de reparo de helicópteros**. The United States Army, Airdrome de Kandahar, 6 set. 2011. Disponível em: https://www.army.mil/article/64591/hums_allows_helicopter_repair_crews_faster_maintenance. Acesso em: 7 ago. 2025.

ANTOL, John K.; KIM, Cheol-Han; LORENZO, Carl F. **System-of-Systems Considerations in the Notional Development of a Prognostic Health Management System for Rotorcraft**. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2009. (NASA/TM—2009-215855).

BEARD, M.; LONGSTAFF, S. **Ethical by Design: Principles for Good Technology**. [S.l.]: The Ethics Centre, 2018. Disponível em: <https://ethics.org.au/ethical-by-design/>. Acesso em: 08 ago 2025

BOSTONAIR. A-Z of Aviation: **The Ultimate Glossary by Bostonair – AOG – Aircraft on Ground**. 15 jul. 2025. Disponível em: <https://www.bostonairgroup.com/a-z-of-aviation-the-ultimate-glossary-by-bostonair/>. Acesso em: 7 ago. 2025.

BOYNE, Walter. J. **How the helicopter changed modern warfare**. Gretna (La.): Pelican Publishing Company, 2011

BOUGACHA, O.; VARNIER, C.; ZERHOUNI, N. Review of Post-Prognostics Decision-Making in Prognostics and Health Management. **International Journal of Prognostics and Health Management**, v. 11, n. 2, 2021.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. CENIPA (Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos). **Helicópteros sumário estatístico 2008-2017**. Brasília, DF: CENIPA, 2017.

BRASIL. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. **Circular nº 3/MB, de 11 de dezembro de 2025**. Brasília, DF, 2025. Assunto: Diretrizes gerais para a governança e gestão da manutenção dos meios operativos da Marinha do Brasil.

BRASIL. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. Estado-Maior da Armada. **EMA – 400, Manual de Logística da Marinha**, 2ª Revisão, Brasília, 2003.

BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. **FAB aposta em Inteligência Artificial para eficiência, segurança e inovação tecnológica**. São José dos Campos, SP: Força Aérea Brasileira, 13 dez. 2024. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/43576/TECNOLOGIA%20-%20FAB%20aposta%20em%20Inteligência%20Artificial%20para%20eficiência>. Acesso em: 7 ago. 2025.

BROWN, David. **The Royal Navy and the Falklands War**. London: Leo Cooper, 1987.

BRÜEL & KJÆR. **Health And Usage Monitoring Systems – HUMS**, Disponível em: <https://www.bksv.com/es/knowledge/applications/machine-analysis/health-and-usage-monitoring-systems-hums>. Acesso em: 06 ago. 2025.

CHOI, Ken. **Navigating the Future: The USS Fitzgerald's Pioneering Integration of AI in Naval Operations**. Medium, 2023. Disponível em: https://medium.com/@junghoonchoi_20153/navigating-the-future-the-uss-fitzgeralds-pioneering-integration-of-ai-in-naval-operations-0ec1648ee65b. Acesso em: 06 ago. 2025.

CLARKE, Roger. Why the world wants controls over Artificial Intelligence. **Computer Law & Security Review**, v. 35, n. 4, p. 423-433, 2019. DOI: 10.1016/j.clsr.2019.04.006.

DEFLANDRE, Romain et al. **Impacto da inteligência artificial na aeronáutica: uma revisão de toda a indústria**. Aerospace Science and Technology, [S.l.], v. 144, 2025.

DELOITTE. Using AI in predictive maintenance: The value of machine learning in predictive maintenance. [S. l.]: **Deloitte Insights**, 2023. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/consulting/articles/using-ai-in-predictive-maintenance.html>. Acesso em: 06 ago 2025.

DONG, Yiqun. An application of Deep Neural Networks to the in-flight parameter identification for detection and characterization of aircraft icing. **Aerospace Science and Technology**, [S.l.], p. 34-49, 2018. DOI: 10.1016/j.ast.2018.02.026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1270963817318242>. Acesso em: 30 jul. 2025.

EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). **Annual Safety Review 2020**. Tech. Rep. TO-AA-20-001-EN-N. Cologne, DE: EASA, 30 jul. 2020. DOI: 10.2822/147804.

FAIZAN. **AI in Helicopter Maintenance - Amygda Featured in Vertical Magazine**. Disponível em: <https://amygdalabs.com/news/ai-in-helicopter-maintenance-amygda-vertical-magazine/> . Acesso em: 30 jul. 2025.

FREEDMAN, Lawrence. **The Official History of the Falklands Campaign**. Vol. 2: War and Diplomacy. London: Routledge, 2005.

FU, Shuai; AVDELIDIS, Nicolas P.; et al. Prognostic and health management of critical aircraft systems and components: **An overview. Sensors** (Basel), v. 23, n. 19, p. 8124, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23198124>. Acesso em: 30 jul. 2025.

HAN, W. et al. A Critical Review of On-Line Oil Wear Debris Particle Detection Sensors. **Journal of marine science and engineering**, v. 11, n. 12, p. 2363–2363, 14 dez. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/12/2363>. Acesso em: 6 ago. 2025.

HEISER, Joseph. M. Vietnam Studies: **Logistic Support**. Washington, DC: Department of the Army, 1974

HOFFMAN, Bryce. Automation Bias: What It Is And How To Overcome It. **Forbes**, 10 mar. 2024. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/brycehoffman/2024/03/10/automation-bias-what-it-is-and-how-to-overcome-it/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

JARDINE, Andrew K. S.; LIN, Daming; BANJEVIC, Dragan. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [S.l.], v. 20, n. 7, p. 1483-1506, out. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327005001512?via%3Dihub>. Acesso em: 29 jul. 2025.

JASIULEWICZ-KACZMAREK, Małgorzata; GOLA, Arkadiusz. Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing – an Overview. **IFAC PapersOnLine**, [S.l.], v. 52, n. 10, p. 91-96, 2019. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.10.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319308468>. Acesso em: 15 jul. 2025.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção preditiva. Fator de sucesso na gestão empresarial**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.

KAHRAMAN, Cengiz; AYDIN, Serhat (ed.). **Intelligent Systems in Aviation 4.0 Industry**. Intelligent and Fuzzy Techniques in Aviation 4.0: Theory and Applications. Cham: Springer, 2022. p. 21–38. DOI: 10.1007/978-3-030-75067-1_2. Disponível

em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-75067-1_2. Acesso em: 8 ago. 2025.

LIAO, Yongxin; GUO, Hanqi; KAMMER, David; XU, Kun. A digital twin-driven smart maintenance framework for aviation systems. **Aerospace**, [S. l.], v. 9, n. 8, p. 462, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/9/8/462>. Acesso em: 29 jul. 2025.

LU, Jichen. **AI in Aviation Maintenance: How It's Changing the Industry**. [S.l.]: QOCO Systems, 2024. Disponível em: <https://www.qoco.aero/blog/ai-in-aviation-maintenance-how-its-changing-the-industry>. Acesso em: 29 jul. 2025.

MIDDLEBROOK, Martin. **The Falklands War**, 1982. Edição revisada. London: Penguin Books, 2001.

MOGHADASNIAN, SeyyedAbdolhojjat; MAHMOUDI, Moslem S. **Stock Control in Airline Logistics: AI-Driven Inventory Optimization for Spare Parts**. (M. MahMoudi, Ed.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCED IN ENGINEERING, INNOVATION AND TECHNOLOGY. Tehran: Tarbiat Modares University, 06 ago. 2025.

MORGAN, Forrest E. et al. **Military Applications of Artificial Intelligence: Ethical Concerns in an Uncertain World**. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2020. Disponível em: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR3139-1.html. Acesso em: 30 jul. 2025

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

NATIONAL SECURITY COMMISSION ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (NSCAI) (U.S.). **Final Report: National Security Commission on Artificial Intelligence**. [S.l.]: s.n., mar. 2021.

NETO, Joaquim Alves Mariano. **Proposta de uma Metodologia de Manutenção Baseada em Condição para a Aviação Militar Brasileira**. 2024. (Estudo de Estado Maior para Oficiais Superiores) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2024

OLIVEIRA NETO, João Manoel et al. Development of a smart system for diagnosing the operating conditions of a helicopter prototype via vibrations analysis. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 12, p. e304101220546, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i12.20546. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/20546>. Acesso em: 30 jul. 2025.

PANIGRAHI, Dijam. **Leveraging AI, Digital Twins and AR/VR for Enhanced Aircraft Maintenance and Repair**. Automation.com, 15 maio 2024. Disponível em: <https://www.automation.com/en-us/articles/may-2024/ai-digital-twins-ar-vr-aircraft-maintenance-repair>. Acesso em: 25 jun. 2025.

PHOKEER, Amreesh. Case Study: Ukraine – **A Role Model for Internet Resilience**. **Internet Society**, Internet Resilience Insights, 24 fev. 2023. Disponível em: <https://pulse.internetsociety.org/blog/case-study-ukraine-a-role-model-for-internet-resilience>. Acesso em: 7 ago. 2025.

POÓR, Peter; ŽENÍŠEK, David; BASL, Josef. Historical Overview of Maintenance Management Strategies: Development from Breakdown Maintenance to Predictive Maintenance in Accordance with Four Industrial Revolutions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 2019, Pilsen, Czech Republic. **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**. Pilsen: IEOM Society International, 2019. p. 495-504

PRIVRATSKY, Kenneth L. **Logistics in the Falklands War : A Case Study in Expeditionary Warfare**. Barnsley, South Yorkshire, England: Pen & Sword Military, 2016

REICHSTHALER, Luisa; PAUER, Thomas; PFEIFER, Andreas. An AI-enhanced Approach for Optimizing Life Cycle Costing of Military Assets. In: IEEE EUROPEAN SYMPOSIUM ON SECURITY AND PRIVACY WORKSHOPS (EURO S&P WORKSHOPS), 2022, Genoa, Italy. **Proceedings of the 2022 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&P Workshops)**. [S.l.]: IEEE, 2022. p. 435-443. DOI: 10.1109/EuroSPW55152.2022.00062.

RODRIGUEZ, Didier Aldana; et al. Inspection of aircrafts and airports using UAS: A review. **Results in Engineering**, [S.l.], v. 22, p. 102330, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102330. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024005851>. Acesso em: 06 ago. 2025.

ROMERO, Raylund; SUMMERS, Harold; CRONKHITE, James. **Feasibility. Study of a Rotorcraft Health and Usage Monitoring System (HUMS): Results of Operator's Evaluation**. National Aeronautics and Space Administration NASA Cleveland: Prepared for Lewis Research Center, fev. 1996.

RUSLING, Matthew. Army Helicopters Brace for Afghanistan Buildup. **National Defense Magazine**, 1 abr. 2009. Disponível em: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2009/4/1/2009april-army-helicopters-brace-for-afghanistan-buildup>. Acesso em: 7 ago. 2025.

SANTOS, Bruno Alves dos. **Análise dos benefícios da manutenção preditiva e proativa e o papel das tecnologias de monitoramento em tempo real para o setor aéreo**. 2024. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Aeronáuticas) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2024.

SANTOS, Flávio Manuel Casqueiro. **Manutenção preditiva e pró-ativa: filosofias alternativas ou complementares: estudo de caso**. 2013. 101 f. Trabalho Final de

Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo Manutenção e Produção) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

SCHWAB, Klaus. **A Quarta Revolução Industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SHAFIEE, M. et al. Unmanned Aerial Drones for Inspection of Offshore Wind Turbines: A Mission-Critical Failure Analysis. **Robotics**, v. 10, n. 1, p. 26, 1 fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/robotics10010026>. Acesso em: 29 jul. 2025.

SOORI, Mohsen; AREZOO, Behrooz; DASTRES, Roza. **Digital twin for smart manufacturing**: A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, v. 2, art. 100017, 2023. DOI: 10.1016/j.smse.2023.100017.

SUVITTAWAT, Nutchanon et al. Advances in Aircraft Skin Defect Detection Using Computer Vision: A Survey and Comparison of YOLOv9 and RT-DETR Performance. **Aerospace**, v. 12, n. 4, p. 356, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/12/4/356>. Acesso em: 23 jun. 2025.
TOLSON, J. J. *Vietnam Studies: Airmobility 1961-1971*. Washington, DC: Department of the Army, 1973.

TOURET, T. et al. On the use of temperature for online condition monitoring of geared systems – A review. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 101, p. 197–210, 15 fev. 2018.

US NAVY. **Condition-Based Maintenance Plus (CBM+) Guidebook**. Washington, DC: Department of the Navy, 2024.

VAN CREVELD, Martin. **Supplying War**. [s.l.] Cambridge University Press, 1977.

VERHAGEN, W. J. C.; SANTOS, B. F.; FREEMAN, F.; VAN KESSEL, P.; ZAROUCAS, D.; LOUTAS, T.; YEUN, R. C. K.; HEIETS, I. **Condition-Based Maintenance in Aviation: Challenges and Opportunities**. *Aerospace — Open Access Aeronautics and Astronautics Journal*, v. 10, n. 9, p. 762, ago. 2023. DOI: 10.3390/aerospace10090762. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/9/762>. Acesso em: 6 ago. 2025.

WRIGHT, Gavin. What is a closed loop control system and how does it work? **TechTarget**, 11 mai. 2022. Disponível em: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/closed-loop-control-system>. Acesso em: 8 ago. 2025.

APÊNDICE - QUADRO COM OS PRINCIPAIS SENSORES UTILIZADOS EM HELICÓPTEROS

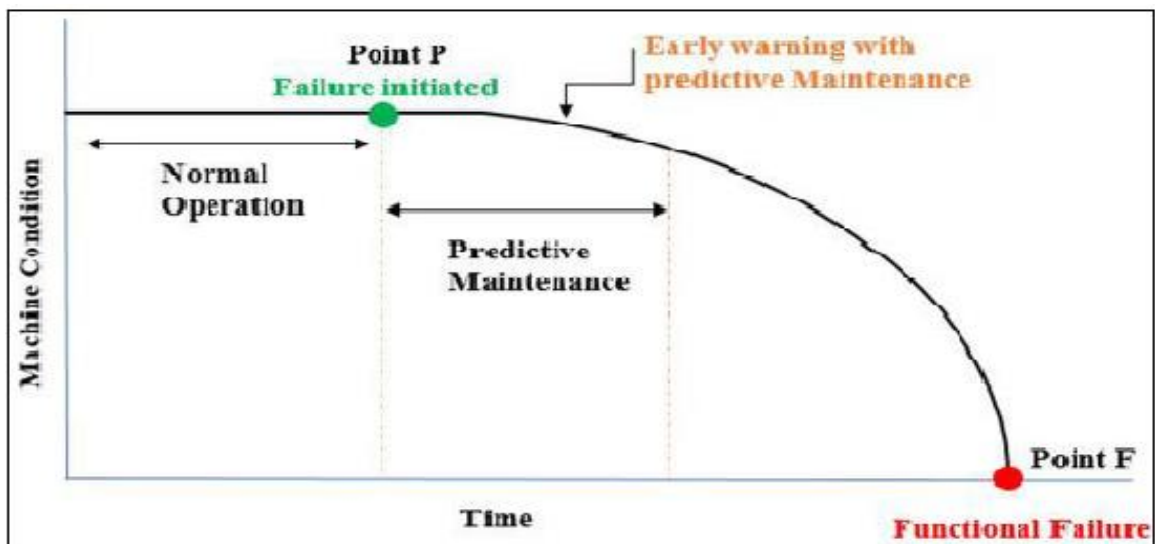
Quadro 1 – Principais sensores em helicópteros: características, aplicação e equipamento típico

Sensor	Princípio / Diferença	Explicação	Aplicação em helicópteros	Equipamento típico
Acelerômetro piezoelétrico	Efeito piezoelétrico; alta frequência	Mede vibrações em rotores/motores; detecta falhas incipientes	Monitoramento HUMS	Sistemas HUMS em UH-60M
Termopar / termistor	Medição térmica via junção ou resistência	Detecta sobreaquecimento em sistemas críticos	Monitoramento térmico (motores, hidráulico)	Sensores de temperatura
Sensor indutivo	Deteção por campo magnético	Identifica desgaste e partículas metálicas no óleo	Monitoramento de contaminação de óleo	Equipamentos de análise de óleo
Sensor óptico	Luz/reflexão para deteção	Avalia partículas ou condições internas	Inspeção visual interna	Sistemas ópticos de diagnóstico
Sensor piezorresistivo	Resistência varia com deformação	Mede pressão em sistemas hidráulicos e de combustível	Monitoramento de pressão crítica	Transdutores de pressão

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nas informações adaptadas sobre sensores em helicópteros descrito nos trabalhos de Han et al. (2023) e Bruel & Kjaer (2025)

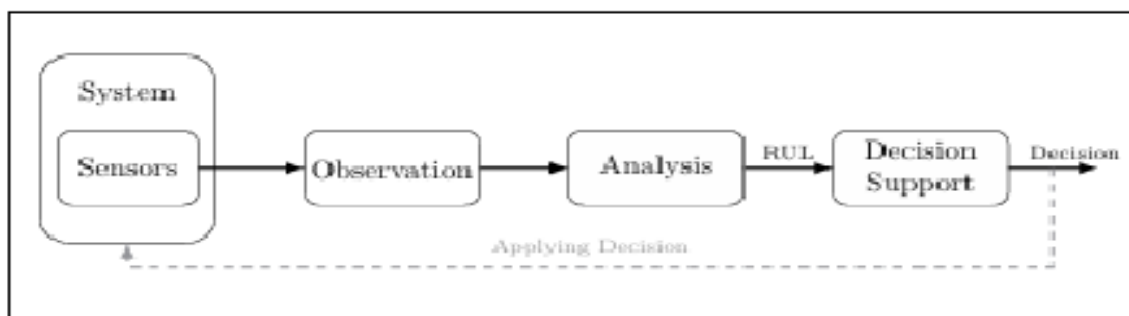
ANEXO A - FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de falhas potenciais apresentando intervalos de inspeção e manutenção preditiva



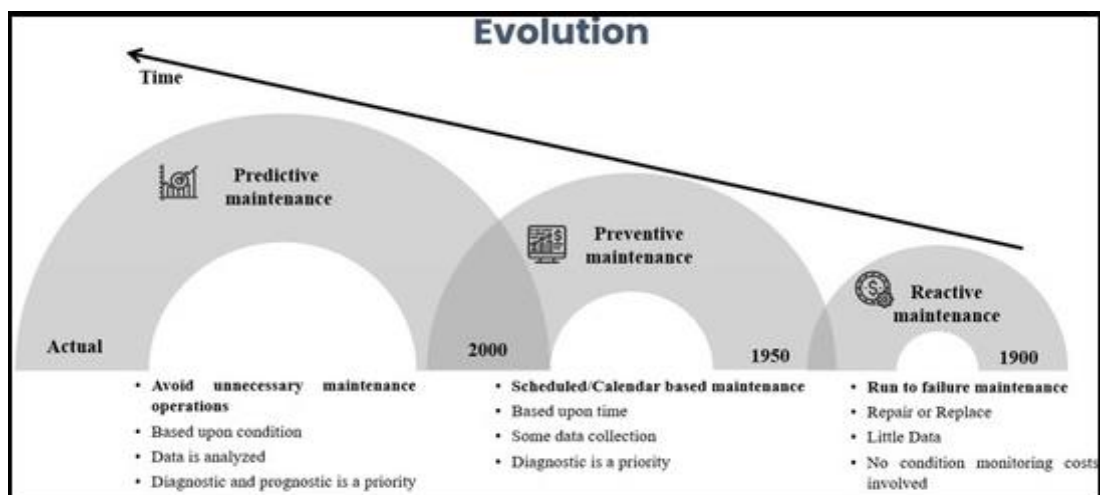
Fonte Achouch et al., 2022

Figura 2 – O processo de PHM proposto



Fonte Bougacha; Varnier; Zerhouni, 2021

Figura 3 – Evolução das atividades e métodos de manutenção



Fonte Achouch et al., 2022