

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITÉCNICA E DE ARTES
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AERONÁUTICAS**



**ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA E PROATIVA E O
PAPEL DAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL PARA O
SETOR AÉREO**

BRUNO ALVES DOS SANTOS

GOIÂNIA

2024

BRUNO ALVES DOS SANTOS

**ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA E PROATIVA E O
PAPEL DAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL PARA O
SETOR AÉREO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas.

Orientador:

Prof. Esp. Andréluiz da Silva Fernandes

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luçany Silva Bueno

Prof. Me. Salmen Chaquip Bukzem

GOIÂNIA
2024

BRUNO ALVES DOS SANTOS

**ANÁLISE DOS BENEFÍCIOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA E PROATIVA E O
PAPEL DAS TECNOLOGIAS DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL PARA O
SETOR AÉREO**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua forma final pela Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas, em 10/12/2024.

Orientador: Prof. Esp. Andréluiz da Silva Fernandes

Prof. Dr. Luçany Silva Bueno

Prof. Me. Salmen Chaquip Bukzem

GOIÂNIA

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guiar em todos os momentos desta jornada. Sua força e inspiração foram essenciais para que eu chegasse até aqui. A conclusão deste trabalho é um momento de grande alegria e realização, e não poderia deixá-lo passar sem expressar minha profunda gratidão.

Agradeço à minha família — meus pais Marcos e Edna, irmãs Natalia e Tharyana, e esposa Ana Clara — que sempre me apoiou incondicionalmente, proporcionou-me amor, compreensão e encorajamento nos momentos de dúvida e dificuldade. Vocês são a minha base e motivação.

Ao meu orientador, professor André Luiz da Silva Fernandes, que contribuiu para que esse momento fosse ameno e calmo. Aos professores, sou eternamente grato pelo conhecimento compartilhado e pela paciência em me guiar durante todo o processo. Suas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação acadêmica.

Aos meus amigos e colegas de curso, obrigado pelas trocas de ideias, pelas discussões e pelo apoio mútuo. Juntos, enfrentamos desafios e celebramos conquistas.

RESUMO

Com o crescimento das exigências de segurança, confiabilidade e eficiência no transporte aéreo, surge a necessidade de métodos mais avançados para a conservação de aeronaves e para táticas preditivas e proativas, pois a manutenção era concentrada em procedimentos restritos à reparação, como reação a defeitos e à prevenção. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar os benefícios da manutenção preditiva e proativa e o papel das tecnologias de monitoramento em tempo real para o setor aéreo, a fim de identificar contribuições que colaborem com uma manutenção mais eficaz, segura e vantajosa. Este trabalho utiliza metodologia qualitativa, baseada em revisão bibliográfica, para entender o estado da arte do tema em estudo. Os resultados indicam que a manutenção preditiva por meio de um sistema de monitoramento contribui para antever problemas ou falhas, principalmente em componentes críticos como os motores, o que permite programar as intervenções de modo planejado. Também colabora com a segurança de voo e a confiabilidade das aeronaves, devido ao monitoramento regular da condição mecânica real, que otimiza os reparos e minimiza os custos com paradas não programadas. A combinação dessas tecnologias com um planejamento estratégico de manutenção proporciona ganhos significativos, pois as operações se tornam mais ágeis e orientadas por dados e resulta em uma utilização otimizada das aeronaves. O uso de tecnologias avançadas minimiza os riscos e promove um ambiente operacional mais seguro e eficiente, atende à crescente demanda do setor por soluções que combinem alta confiabilidade com práticas sustentáveis, e alinha-se às diretrizes de segurança internacional e ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: manutenção de aeronaves; aviação; monitoramento em tempo real; manutenção preditiva e proativa; segurança.

ABSTRACT

With the growing demands for safety, reliability and efficiency in air transportation, there is a need for more advanced methods for aircraft maintenance and for predictive and proactive tactics, since maintenance used to be concentrated on procedures restricted to repair, as a reaction to defects and prevention. The aim of this paper is therefore to analyze the benefits of predictive and proactive maintenance and the role of real-time monitoring technologies for the airline industry, to identify contributions that will contribute to more effective, safe and advantageous maintenance. This work uses a qualitative methodology, based on a literature review, to understand the state of the art of the subject under study. The results indicate that predictive maintenance by means of a monitoring system helps to anticipate problems or failures, especially in critical components such as engines, which makes it possible to program interventions in a planned manner. It also contributes to flight safety and aircraft reliability, due to the regular monitoring of the actual mechanical condition, which optimizes repairs and minimizes the costs of unscheduled downtime. Combining these technologies with strategic maintenance planning brings significant gains, as operations become more agile and data-driven, and results in optimized aircraft utilization. The use of advanced technologies minimizes risks and promotes a safer and more efficient operating environment, meets the industry's growing demand for solutions that combine high reliability with sustainable practices, and aligns with international safety and environmental guidelines.

KEYWORDS: aircraft maintenance; aviation; real-time monitoring; predictive and proactive maintenance; safety.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Procedimentos metodológicos	9
2 REVISÃO TEÓRICA.....	9
2.1 Manutenção em geral e em aeronaves	10
2.1.1 Evolução da manutenção em geral e aeronáutica	10
2.1.2 Tipos de manutenção em geral	12
2.1.3 Manutenção em aeronaves.....	13
2.1.4 Plano de manutenção de aeronave	15
2.2 Sistemas de monitoramento em tempo real: da abordagem preditiva à eficácia do seu uso	16
2.2.1 Contribuições da manutenção preditiva e proativa para o setor aéreo	16
2.2.2 Manutenção preditiva na importância do sistema de monitoramento	18
2.2.3 Sistemas de monitoramento em tempo real	19
CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERÊNCIAS	22
BIODADOS	24

1 INTRODUÇÃO

A manutenção de aeronaves é fundamental para garantir a segurança, a eficácia e a confiabilidade das atividades aéreas, e está intimamente ligada à preservação de vidas e à viabilidade econômica das empresas do setor. Recentemente, a conservação de aeronaves evoluiu de procedimentos restritos à reparação e à prevenção, concentrados unicamente na reação a defeitos, para táticas preditivas e proativas. Essa transformação foi motivada pelo progresso tecnológico e pela urgência de satisfazer os exigentes níveis de segurança e eficiência de recursos. A última estratégia emprega sistemas de observação em tempo real, como o Sistema de Monitoramento de Saúde (HMS) e o Monitoramento de Condição (CM), que possibilitam supervisionar o estado dos elementos e antecipar defeitos antes que prejudiquem o funcionamento da aeronave (Zhong-ji; Zhiqiang; Yan-Bin 2012).

A manutenção preventiva, fundamentada na observação ininterrupta, constitui uma solução para os obstáculos de assegurar a confiabilidade de agrupamentos de aeronaves cada vez mais sofisticadas. O tema que inspira esta pesquisa é a necessidade de utilizar procedimentos de manutenção que não apenas demandem menos intervenção manual, mas também garantam elevado nível de acurácia na detecção de possíveis defeitos, reduzam os gastos e aumentem a segurança operacional.

O assunto é pertinente para a aviação contemporânea, em virtude da influência direta dessas abordagens na segurança e na eficácia operacional. Empresas aéreas e fabricantes têm dedicado recursos em tecnologia para otimizar o controle de manutenção, ao reconhecerem que a previsão de defeitos é um aspecto fundamental para a segurança, enquanto também resulta em economia relevante. A instauração desses sistemas colabora não somente para a segurança, mas para a competitividade e a sustentabilidade, visto que amplia a durabilidade dos elementos e diminui o tempo em terra das aeronaves, elementos vitais em um campo altamente competitivo (Levandowski, 2013).

Nesse cenário, surgem questões acerca das concepções de manutenção preditiva e proativa e como os sistemas de supervisão em tempo real podem colaborar para uma administração de manutenção mais eficaz, segura e vantajosa. Diante disso, este estudo se propõe a analisar o efeito dos sistemas de vigilância em tempo real no planejamento e na realização das tarefas de conservação, a fim de entender como essas tecnologias conseguem enfrentar os obstáculos de confiabilidade e proteção.

Para isso, o objetivo geral é analisar os benefícios da manutenção preditiva e proativa e o papel das tecnologias de monitoramento em tempo real para o setor aéreo. Os objetivos

específicos são: 1) conhecer o contexto da manutenção geral e em aeronaves; 2) investigar como os sistemas de monitoramento em tempo real, como o *Smart Link Plus* e o *Health Monitoring System* (HMS), contribuem para a identificação de falhas e a otimização de operações.

Este trabalho, que utiliza metodologia qualitativa, baseada em revisão bibliográfica, para entender o estado da arte do tema em estudo, está dividido em duas partes principais: a manutenção geral e em aeronaves, em que é exposta a progressão das atividades de manutenção aérea, com noções que vão desde a manutenção reativa até as estratégias preventivas e antecipatórias; e os sistemas de monitoramento em tempo real, que apresenta os sistemas de vigilância em tempo real, com suas tecnologias e benefícios para a manutenção aeronáutica.

1.1 Procedimentos metodológicos

Para esta revisão bibliográfica, foram realizados procedimentos de pesquisas, cujas fontes foram bases de dados científicos, com vistas a atender os objetivos deste trabalho. Essas bases foram: o portal da Capes Periódicos, Google Acadêmico, Scientific Electronic Library Online (SciELO) e o Repositório Acadêmico de Graduação (RAG) da PUC GO.

A busca foi realizada entre os dias 10 e 30 de setembro de 2024, e utilizou os seguintes descritores: “manutenção de aeronaves”; “monitoramento em tempo real”; “manutenção preditiva”; “manutenção proativa”; “plano de manutenção de aeronave”. Foram consideradas as publicações entre 2006 e 2024, em português e inglês.

O resultado da pesquisa retornou 521 trabalhos, e dentre eles, foram selecionados 13, entre artigos e trabalhos de conclusão de curso, de acordo com relevância do conteúdo para o estudo. Esses trabalhos foram lidos e resumidos, cujos autores estão descritos a seguir: Machado, Urbina e Eller (2008); Cortes e Albuquerque (2009); Kardec e Nascif (2009); Zhongji, Zhiqiang e Yan-Bin (2012); Costa (2013); Levandowski (2013); Santos (2013); Barboza (2018); Benício (2017); Bevictori e Alves (2017); Pessanha (2017); Verhagen *et al.*, (2023); Batista e Monteiro (2024).

2 REVISÃO TEÓRICA

A seguir, apresentam-se os contextos relacionados à manutenção em geral e, em específico, as manutenções de aeronaves, além de estratégias que contribuem para a eficiência, segurança e confiabilidade do setor.

2.1 Manutenção em geral e em aeronaves

Esta seção trata de definições conceituais de manutenção em geral e sua evolução em quatro gerações; os tipos de manutenção existentes, a manutenção específica de aeronaves, além do plano de manutenção de aeronaves. Além disso, enfatiza as contribuições da manutenção preditiva e proativa para o setor aéreo e aborda os sistemas de monitoramento em tempo real.

2.1.1 Evolução da manutenção em geral e aeronáutica

Para contextualizar o objeto desta pesquisa, é importante entender a evolução da manutenção, ao longo do tempo, tanto da manutenção em geral quanto da manutenção em aeronaves.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, inclusive aquelas de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT, 1994).

Kardec e Nascif (2009, p. 7) definem o ato de manter ou a manutenção como “[...] garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção e a preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados”.

Por sua vez, Nepomuceno (1989) afirma que manutenção é o ato de consertar ou reparar, visto que todo e qualquer equipamento ou maquinário, seja ele simples ou sofisticado, necessita de um acompanhamento quando ficar indisponível.

De acordo com os autores Kardec e Nascif (2009) a evolução da manutenção pode ser estruturada em quatro gerações. A primeira geração teve início com o advento da Revolução Industrial. Nessa época, os reparos eram realizados de forma improvisada, pelos próprios trabalhadores que operavam as máquinas, o que caracterizava uma manutenção não organizada e sem planejamento adequado, em um sistema que pode ser descrito como "quebra-repara" (Barboza, 2018).

Para (Santos, 2013), na primeira geração, a indústria era pouco mecanizada com equipamentos de configurações simples e subdimensionados, as técnicas de manutenção eram precárias e simples, e consistiam nas limpezas, na lubrificação e na inspeção visual. As competências técnicas exigidas também eram mínimas, o carácter da manutenção era estritamente corretivo. A visão em relação às falhas dos equipamentos era de que todos os equipamentos se desgastavam com o tempo, até o momento de sua quebra, ou seja, a

manutenção era corretiva e não planejada, pois na época, a produtividade não era prioridade (Kardec; Nascif, 2009).

Com a Primeira Guerra Mundial esse cenário começou a mudar e a introdução da produção em série, ganha destaque com Henry Ford. A busca por eficiência e o aumento de produtividade levou à necessidade de criação de grupos especializados em manutenção, o que resultou na formalização da manutenção corretiva e, ainda assim, até meados dos anos 1920 e 1930, o foco principal estava no conserto de máquinas que já haviam falhado, sem maior preocupação com prevenção ou planejamento estratégico (Barboza, 2018).

A segunda geração ocorreu em um contexto após a Segunda Guerra Mundial entre os anos de 1950 e 1970, em que as demandas por produtos aumentaram, enquanto a mão de obra diminuiu significativamente, acarretando o aumento da mecanização nas fábricas, o elevado o nível de complexidade das operações industriais, e com isso, uma maior disponibilidade ou estoque, bem como evidenciou a confiabilidade (Kardec; Nascif, 2009).

Nesse contexto, a indústria passa a ser dependente do bom funcionamento das máquinas, e assim, surgiu a ideia de manutenção preventiva (Kardec; Nascif, 2009). A prática dessa ideia resultou na necessidade de implementar sistemas de planejamento e gestão da manutenção. É também nessa época (anos 1960 e 1970), que o Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, juntamente com a indústria aérea militar, desenvolveu as primeiras políticas de manutenção, chamadas *Reliability-Centred Maintenance* (RCM) que é um processo no qual as organizações identificam os ativos necessários para a produção de seus produtos, criando estratégias para manter sua operação num nível ideal (Santos, 2013).

No período pós-guerra, entre 1950 e 1970, a crescente complexidade dos sistemas aeronáuticos, bem como a evolução da eletrônica e da engenharia, levou à criação da engenharia de manutenção. Esse novo campo buscava não apenas corrigir falhas, mas entender profundamente suas causas, além de desenvolver métodos para evitar sua recorrência. Foi nesse contexto que surgiram conceitos mais sofisticados de diagnóstico de falhas e controle de manutenção, o que influenciou diretamente a manutenção aeronáutica, que passou a incorporar práticas de manutenção preventiva de maneira mais sistemática (Barboza, 2018).

Entre as décadas de 1970 e 1990, a manutenção aeronáutica adotou estratégias como a Total Productive Maintenance (TPM) que significa Manutenção Produtiva Total, e a Reliability Centered Maintenance (RCM) que significa manutenção centrada na confiabilidade. Essas estratégias visavam à maximização da confiabilidade dos sistemas e à minimização das falhas por meio de ações proativas. A manutenção preditiva também ganhou espaço nesse período, com o uso de tecnologias avançadas de monitoramento, permitindo a identificação de falhas

potenciais antes que ocorressem, o que melhorou significativamente a segurança e a eficiência operacional das aeronaves (Barboza, 2018).

Os processos industriais ganharam novos desafios de produtividade e de qualidade com a tendência da globalização da economia. Com o grande investimento nos itens fixos, juntamente com o aumento nos custos, inicia-se um processo de elevadas expectativas em relação à manutenção. Tais expectativas estão nas funções e nos resultados da manutenção, nas novas interpretações dos processos de falhas de equipamentos e nas novas técnicas de análise e implementação da manutenção, e assim, foram criadas alternativas a fim de maximizar a vida útil dos itens físicos (Santos, 2013).

Segundo Kardec e Nascif (2009), a terceira geração tem se destacado no conceito e na utilização da manutenção preditiva e que com o avanço da informática permitiu a utilização de programas para o planejamento, o controle e o acompanhamento dos serviços de manutenção, o que aplicou ainda mais o conceito de confiabilidade nas áreas de manutenção e engenharia.

Na quarta geração a manutenção se insere nos sistemas integrados de gestão, tendo em conta a melhoria da manutenibilidade e engenharia da manutenção, por meio da tecnologia avançada de sistemas interligados, investimentos otimizados e produtos inteligentes (Santos, 2013). Nos anos mais recentes, a manutenção preditiva foi complementada pela manutenção proativa, que não apenas prevê falhas, mas busca ações que estabilizem o sistema e inibam a ocorrência de problemas. Essa abordagem reflete um avanço significativo na gestão da manutenção, especialmente no setor aeronáutico, no qual a segurança é primordial e a confiabilidade dos sistemas é vital para evitar catástrofes (Barboza, 2018).

2.1.2 Tipos de manutenção em geral

Para aprofundar um pouco mais a respeito da manutenção em suas gerações, é preciso conhecer cada uma delas: a manutenção corretiva; a manutenção preventiva; a manutenção preditiva; e a manutenção proativa.

A manutenção corretiva é efetuada após a ocorrência de uma falha, com o objetivo de restaurar o item para que volte a cumprir sua função (ABNT, 1994). Esse tipo de manutenção atua para a correção de falha ou de desempenho menor que o esperado, a fim de corrigir ou restaurar as condições de funcionamento do equipamento ou sistema (Kardec; Nascif, 2009). De acordo com Costa (2013), as manutenções corretivas são as formas mais simples e primitivas, elas significam deixar as instalações continuarem a operar até que quebrem, o trabalho de manutenção é realizado somente após a quebra do equipamento ter ocorrido.

Segundo Santos (2013), a manutenção corretiva não planejada ocorre de forma aleatória, após a falha já ter ocorrido. Por outro lado, a manutenção corretiva planejada é realizada em períodos programados, com intervenção e monitoramento do equipamento, desde que o defeito não resulte necessariamente em uma falha imediata.

De acordo com a NBR-5462 (ABNT, 1994), o conceito da manutenção preventiva segue um cronograma definido no manual do fabricante da aeronave, é aquela realizada em intervalos definidos ou de acordo com critérios estabelecidos, com o propósito de reduzir a chance de falha ou degradação do desempenho de um item.

Para Kardec e Nascif (2009), a manutenção preventiva é a atuação realizada de forma a reduzir a falha ou queda no desempenho, de acordo com um plano previamente elaborado, baseado em intervalos de tempo. Ela será mais oportuna tanto quanto maior for a simplicidade na reposição, quanto maior forem os custos de falhas. Esse tipo de manutenção é realizado com o objetivo de reduzir ou evitar falhas ou a diminuição do desempenho, conforme um plano preventivo baseado em intervalos de tempo definidos. Quando aplicada de forma isolada, a manutenção preventiva pode se tornar custosa e ineficiente.

A manutenção preditiva é um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, a fim de definir a necessidade ou não de intervenção (Machado; Urbina; Eller, 2008). Esse tipo de manutenção utiliza técnicas de análise sistemática e supervisão centralizada ou por amostragem para garantir a qualidade do serviço, de modo a minimizar a manutenção preventiva e reduzir a necessidade de ações corretivas (ABNT, 1994).

Kardec e Nascif (2009) corroboram a ideia de que a manutenção preditiva é aquela realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. Já de acordo com Benício (2017), esse tipo de manutenção é aquela realizada antes que ocorra qualquer tipo de quebra ou falha em um equipamento ou sistema.

Barboza (2018) entende que a manutenção proativa é aquela baseada em métodos semelhantes àqueles utilizados pela manutenção preventiva, no entanto, estabelece ações antecipadas, com o objetivo de manter a estabilidade de um sistema ou equipamento e, assim, permite inibir o início da ocorrência da falha ou quebra.

2.1.3 Manutenção em aeronaves

É essencial abordar os tipos de manutenção existentes à manutenção realizada em aeronaves, que contribuem para a segurança, a competitividade e a sustentabilidade do setor.

De acordo com os autores Machado, Urbina e Eller (2015) a manutenção corretiva ocorre depois que um problema é identificado e diagnosticado, o chamado *Condition Monitoring* (CM). Durante esse diagnóstico, os técnicos de manutenção têm que identificar as partes que falharam e fazer as respectivas ações de reparo. O CM tem desempenhado um papel vital na manutenção preditiva da aviação, especialmente no gerenciamento da saúde de frotas e componentes críticos, como motores e sistemas de resfriamento de aeronaves.

Segundo Machado, Urbina e Eller (2008), a filosofia da manutenção preventiva é a prática de substituir componentes ou subsistemas antes que eles falhem, normalmente com frequência predeterminada, o *hard time* (HT) ou em virtude de inspeção e teste. O objetivo é manter a operação contínua do sistema, nesse caso, a aeronave.

O MCA 66-7 (Brasil, 2014) define que um processo de manutenção HT é aquele onde é estabelecido o limite de uso operacional: o TBO (*time between overhaul*) ou TLV (tempo limite de vida), para itens recuperáveis; e o TLV, para itens consumíveis. Trabalhando com TBO, valores são estipulados para a realização de uma revisão geral em sistemas e acessórios, tais como: motor, hélice metálica e outros, e esses limites são definidos dentro da vida em serviço fornecida pelo fabricante ou constatada pelo operador. Embora a HT seja eficiente em termos de previsibilidade e simplicidade de implementação, ela pode resultar em altos custos operacionais devido à manutenção excessiva. Componentes podem ser substituídos antes de esgotarem completamente sua vida útil, o que gera desperdício de recursos e aumenta os custos de reposição (Bevictori; Alves, 2017).

A filosofia *On Condition* (OC) é uma forma de manutenção preventiva condicional que tem como base a avaliação contínua ou periódica da condição dos componentes. Em vez de ser aplicada em intervalos fixos de tempo, a manutenção OC ocorre quando os dados de inspeção indicam que um componente está perto de falhar ou que a sua performance foi significativamente reduzida (Bevictori; Alves, 2017).

Segundo o MCA 66-7 (Brasil, 2014), essa abordagem permite que os componentes sejam inspecionados sem a necessidade de remoção ou revisão completa, por meio de técnicas como boroscopia, espectrometria de óleo, e monitoramento da vibração, o que aumenta a eficiência operacional e reduz o tempo de inatividade. Os sistemas de monitoramento contínuo capturam dados acerca da condição do ativo, a fim de permitir que os engenheiros identifiquem sinais precoces de deterioração ou falhas iminentes. Essa abordagem é amplamente usada em setores como a aviação, na qual as variações nas condições de operação de motores e outros sistemas complexos tornam o ciclo de vida dos componentes altamente imprevisível (Bevictori; Alves, 2017).

Na filosofia empregada para monitorar equipamentos que não utilizam a HT e a OC, de forma preditiva, os itens CM são usados até sua falha, e as taxas de falha são rastreadas para auxiliar na previsão desta e nas atividades de prevenção. Em caso de ocorrência de falhas, a troca ou reparo do componente é realizada em manutenções não programadas (Batista; Monteiro, 2024)

Na aviação, a manutenção baseada em condição (CBM) tem sido aplicada para prever falhas antes que ocorram, o que otimiza as operações e aumenta a disponibilidade das aeronaves. A capacidade de prever falhas com precisão tem transformado a forma como as companhias aéreas planejam e executam suas atividades de manutenção com uma abordagem mais eficiente e segura para o setor (Verhagen *et al.*, 2023).

Já Benício (2017) traz que também há a engenharia de manutenção que tem como objetivo modernizar as técnicas aplicadas à manutenção, para gerar melhoria continuada, que vai além da supervisão preditiva. Ela realiza coleta de dados e informações que proporcionam subsídios para avaliações que resultem em melhorias de produção.

2.1.4 Plano de manutenção de aeronave

O plano de manutenção de aeronaves é essencial para garantir a aeronavegabilidade contínua e segura ao longo da vida útil das aeronaves. Esse processo é regulamentado por uma série de documentos e regulamentos emitidos por autoridades aeronáuticas, como a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), que estabelecem os requisitos para a criação e execução desses planos, a fim de assegurar que as operações aéreas sejam realizadas de maneira segura e que minimize os riscos para a segurança dos passageiros e da tripulação (Levandowski, 2013).

No Brasil, os procedimentos de inspeção e manutenção são supervisionados pela ANAC, mas monitorar a eficácia dessas atividades é um desafio significativo. A inspeção de manutenção pode variar desde uma verificação visual simples, como uma inspeção ao redor da aeronave, até uma manutenção mais complexa, que envolve o desmonte completo da aeronave. As transportadoras programam verificações em diferentes intervalos, como os cheques de linha de voo, para garantir que todos os aspectos da manutenção sejam cobertos (Levandowski, 2013).

O principal documento que orienta a manutenção das aeronaves é o Programa de Manutenção, que deve ser elaborado por cada empresa aérea, conforme as especificidades de suas operações e com base no Maintenance Planning Data (MPD) fornecido pelo fabricante da aeronave. Esse programa é submetido à aprovação da ANAC e deve atender a todos os requisitos estabelecidos no Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) nº 121 e no

Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) nº 43, que regulam, respectivamente, as operações das empresas de linhas aéreas e os serviços de manutenção aeronáutica (Levandowski, 2013).

Além do regulamento nacional, a manutenção de aeronaves é influenciada por práticas internacionais, como a metodologia Maintenance Steering Group (MSG-3), que estabelece tarefas de manutenção e intervalos com base na confiabilidade de sistemas e componentes, a fim de otimizar a eficiência dos serviços e reduzir custos sem comprometer a segurança. O MSG-3 é fundamental na elaboração dos Programas de Manutenção e tem sido amplamente adotado na indústria aeronáutica global devido à sua abordagem sistemática e lógica para identificar falhas e definir tarefas (Levandowski, 2013).

2.2 Sistemas de monitoramento em tempo real: da abordagem preditiva à eficácia do seu uso

A fim de aprofundar os conhecimentos a respeito da manutenção preditiva e proativa em aeronaves, abordam-se as contribuições da manutenção preditiva e proativa para o setor aéreo, além dos sistemas de monitoramento e em tempo real e seus benefícios para a área.

2.2.1 Contribuições da manutenção preditiva e proativa para o setor aéreo

Para calcular os custos diretos das manutenções, é preciso considerar as horas de trabalho necessárias para as tarefas de manutenção, tanto rotineiras quanto inesperadas. No sistema tradicional, as horas de trabalho são geralmente fixadas por cronogramas, enquanto no sistema moderno, as horas tendem a ser reduzidas devido à maior eficiência da manutenção direcionada. Além disso, é preciso estimar os custos com consumíveis, peças de reposição e outros materiais. Nos sistemas tradicionais, as peças podem ser substituídas com mais frequência como medida de precaução, enquanto nos sistemas modernos, a substituição é baseada na condição real, o que pode reduzir o desperdício.

Também devem ser levados em consideração os custos do uso de ferramentas e instalações de manutenção, e para isso, os sistemas modernos podem exigir equipamentos de diagnóstico especializados. Além dos custos diretos, é preciso considerar as despesas gerais, que envolvem custos indiretos relacionados às operações de manutenção, como utilitários, uso das instalações e suporte administrativo. Embora esses custos existam para ambos os sistemas, eles podem ser menores nos sistemas modernos, devido à maior eficiência nas operações de manutenção (Kabashkin *et al.*, 2024).

Os custos indiretos também incluem o impacto do tempo de inatividade nas operações. Nos sistemas modernos, busca-se minimizar esse tempo programando para a manutenção de forma otimizada e com reparos realizados de maneira mais rápida e precisa. A eficiência operacional pós-manutenção também é um fator relevante, já que pode afetar a produtividade e os custos operacionais. Nos sistemas modernos, a maior precisão na manutenção tende a manter uma eficiência superior. Por outro lado, nos sistemas tradicionais, à medida que os componentes envelhecem, a frequência e o custo da manutenção aumentam devido ao desgaste, o que resulta em custos crescentes ao longo do tempo. Esse comportamento pode ser modelado por funções de tempo, e reflete a crescente necessidade de reparos e substituições. Para os sistemas modernos, embora os custos iniciais de manutenção possam ser mais elevados, devido à integração de novas tecnologias, como os AHMSs, eles tendem a diminuir ao longo do tempo à medida que o sistema se torna mais eficiente na previsão e mitigação do desgaste antes que ocorra falha (Kabashkin *et al.*, 2024).

Um exemplo prático da eficiência dessa tecnologia é a sua aplicação nas aeronaves da US Navy. Zhong-ji; Zhiqiang e Yan-Bin (2012) relatam que, com o uso de tecnologias de monitoramento, a frota de F-4J teve seus ciclos de manutenção ampliados em 20%, com o intervalo para revisão dos motores aumentado de 1.200 horas para 2.400 horas. O sistema PHM (Prognostics and Health Management), tecnologia central do monitoramento de saúde, também contribuiu para a redução de 50% dos equipamentos de suporte na aeronave JSF, bem como uma diminuição de 20% a 40% no número de engenheiros de manutenção, resultando em um aumento de 25% na taxa de produção.

Segundo o estudo *PWC's Predictive Maintenance 4.0 – Beyond the Hype: PdM delivers results*, realizado com 268 empresas europeias da Bélgica, Alemanha e Países Baixos, a manutenção preditiva apresenta diversos benefícios relevantes. A pesquisa aponta que a implementação dessa estratégia de manutenção pode reduzir os custos operacionais em 12%, além de aumentar a disponibilidade dos ativos em 9%. Outro dado significativo é o aumento da vida útil de ativos envelhecidos em 20%, o que representa um aumento considerável na durabilidade dos equipamentos. Além disso, a manutenção preditiva contribui para a redução dos riscos relacionados à segurança, saúde, meio ambiente e qualidade em 14%, o que reforça sua importância para a gestão eficaz e segura de ativos industriais. Esses dados indicam a relevância da manutenção preditiva para o aprimoramento da eficiência operacional e a mitigação de riscos nas organizações (PWC, 2018).

Para Pereira e Oliveira (2022) atividades que não possuem planejamento, ocorre um desperdício de tempo de 65 %, ou seja, 8 horas regulares de trabalho, em que 2,8 horas são

efetivamente aproveitadas, após a implementação de um plano de manutenção preventiva. A expectativa é que o tempo produtivo de trabalho suba de 35% para no mínimo 65%, e eleve o tempo produtivo de 2,8 horas para 5,2 horas. Para diminuir ao máximo a perda de tempo das atividades de manutenção, o correto é seguir as sistemáticas de planejamento e controle de manutenção, e dimensionar de forma assertiva o volume de atividades que devem ser realizadas para manter os ativos confiáveis e disponíveis.

2.2.2 Manutenção preditiva na importância do sistema de monitoramento

A manutenção preditiva permite uma antevisão a um possível sinal de problema, ou indício de falha, assim, é possível programar as intervenções nas máquinas de modo planejado. Pode-se, inclusive, programar a compra de peças para reposição, o que reduz os custos de formação de estoques (Pessanha, 2017).

No que tange à segurança de voo, a utilização da manutenção preditiva tem auxiliado os operadores a aumentarem o nível de segurança e de confiabilidade das aeronaves. Na prática, seria possível identificar um componente que, depois de inspecionado, tenha sido considerado em conformidade e, perante a análise de vibração em um programa de manutenção preditiva, foi constatado o contrário. A anomalia da assinatura vibratória poderia significar a existência de trincas que, ao se propagarem, desencadearão uma ruptura, caso não fosse substituído. O benefício da manutenção preditiva é que o monitoramento regular da condição mecânica real e outros indicadores da condição operativa do meio, asseguram um intervalo máximo entre os reparos, o que minimiza os custos com paradas não programadas criadas por falhas da máquina e permite uma ação proativa (Pessanha, 2017).

A importância de um sistema de monitoramento em aeronaves, para a manutenção preditiva é vital, pois permite antecipar falhas, por meio do monitoramento constante de componentes críticos, como motores e rotores. Esses sistemas utilizam sensores, principalmente de vibração, para coletar dados que são processados e analisados, o que possibilita diagnósticos e prognósticos precisos. A manutenção preditiva, baseada nesses diagnósticos, evita falhas catastróficas e melhora significativamente a segurança de voo (Cortes; Albuquerque, 2009).

Os benefícios incluem o aumento da confiabilidade e segurança, pois ele permite a substituição de componentes antes que falhem, o que minimiza o risco de acidentes. Além disso, há uma redução nos custos operacionais, uma vez que as inspeções e manutenções são realizadas de forma mais eficiente, com base na condição real dos componentes, e não em intervalos fixos de tempo ou ciclos de operação (Rosenberg, 2010).

Outra vantagem importante é o aumento da disponibilidade operacional, já que as aeronaves podem continuar operando até o momento ideal para manutenção, com base nos dados coletados. Isso resulta em menos tempo de inatividade e maior eficiência nas operações. Dessa forma, os sistemas de monitoramento, são essenciais para a aplicação da filosofia de manutenção preditiva nas aeronaves, o que proporciona maior segurança, disponibilidade e economia (Cortes; Albuquerque, 2009).

2.2.3 Sistemas de monitoramento em tempo real

Os sistemas de monitoramento em tempo real têm se tornado fundamentais na manutenção aeronáutica, já que proporcionam maior eficiência e segurança nas operações. Um exemplo notável dessa tecnologia é o *Smart Link Plus*, desenvolvido pela Bombardier, que tem redefinido os padrões de diagnóstico e gestão de saúde das aeronaves (Bombardier, 2024).

O *Smart Link Plus* coleta dados de aproximadamente 12 mil parâmetros da aeronave, em tempo real, e transmite essas informações simultaneamente para a tripulação em voo e para as equipes de manutenção em solo. Segundo a Bombardier (2024), essa tecnologia permite que eventuais falhas ou mensagens de alerta detectadas no cockpit sejam analisadas de forma imediata, o que facilita o diagnóstico e a resolução rápida de problemas. A automação do sistema reduz o tempo gasto com métodos manuais de rastreamento de falhas e possibilita que tripulações e equipes técnicas atuem de maneira mais eficaz.

Além disso, o *Smart Link Plus* apresenta diversas vantagens operacionais. Conforme apontado por Bombardier (2024), o sistema não só aumenta a disponibilidade da aeronave, evita situações de *Aircraft on Ground* (AOG), como também reduz a carga de trabalho da tripulação. Isso ocorre porque o sistema elimina a necessidade de envio manual de informações pós-voo, como relatórios ou capturas de tela de alertas. O sistema garante que toda a comunicação relevante entre aeronave e solo ocorra de forma automática e contínua.

Outro benefício relevante é a capacidade de tomar decisões baseadas em dados em tempo real, o que, de acordo com Bombardier (2024), melhora a eficiência operacional e permite que as equipes de manutenção estejam preparadas para agir de maneira proativa. O *Smart Link Plus* ainda se alinha com as tendências futuras da manutenção aeronáutica, como a transição para modelos de manutenção preditiva, que permitem substituir ou reparar componentes antes que falhem, e assim, promover uma maior economia de tempo e recursos (Bombardier, 2024). Com a evolução das tecnologias e o conceito de aeronaves conectadas, o *Smart Link Plus* se torna um componente essencial na quarta Revolução Industrial, que integra

aeronaves, equipes de manutenção e operadores em um ambiente de dados contínuos e em tempo real (Bombardier, 2024).

Outro sistema de monitoramento em tempo real relevante na manutenção de aeronaves é o *Health Monitoring System* (Sistema de Monitoramento de Saúde), que atua de forma a prever e diagnosticar falhas em componentes críticos de uma aeronave. Segundo Zhong-ji, Zhiqiang e Yan-Bin (2012), o conceito de "monitoramento de saúde" foi originalmente introduzido na área de cuidados de saúde, e se refere ao monitoramento de organismos biológicos.

Quando aplicado à aviação, esse conceito envolve a detecção e previsão de falhas incipientes em sistemas e subsistemas antes que se tornem incidentes graves, o que contribui para prevenir acidentes catastróficos. O sistema de monitoramento de saúde das aeronaves é baseado em tecnologias de redes de sensores sem fio, testes embutidos e comunicação de banda ultra larga, as quais permitem que o sistema analise dados relevantes ao funcionamento e manutenção da aeronave por meio de técnicas de mineração de dados. Os sistemas de monitoramento de saúde em tempo real são capazes de perceber, classificar e prever falhas a tempo, o que otimiza a vida útil dos principais componentes da aeronave e reduz custos operacionais e de manutenção (Zhong-ji; Zhiqiang; Yan-Bin 2012).

Além disso, o sistema utiliza tecnologias de integração de informações de multi-sensores para diagnosticar falhas sistemáticas, e dados para informar os usuários acerca de políticas de manutenção baseadas nas demandas e condições reais dos componentes da aeronave. O sistema também incorpora funções como previsão de falhas, medição de falhas, isolamento de falhas, monitoramento da vida útil dos componentes e relatórios de falhas, o que permite que a manutenção seja realizada de forma precisa e no momento certo, o que reduz a quantidade de intervenções, economiza custos de manutenção e melhora a taxa de disponibilidade das aeronaves (Zhong-ji; Zhiqiang; Yan-Bin 2012).

O *Health Monitoring System* é composto por duas partes principais: o *Airborne Health Monitoring Sub-system* (AHMS), que monitora a saúde da aeronave em voo; e o *Ground Health Diagnostic Sub-system* (GHMS), que realiza o diagnóstico da aeronave em solo. Esses dois subsistemas se comunicam por meio de um sistema de comunicação em tempo real, que mantém o fluxo de dados entre a aeronave e as equipes em terra. O sistema é de grande valor teórico e prático, pois melhora a segurança de voo ao monitorar continuamente o estado estrutural da aeronave e ao prever falhas potenciais, o que contribui para que as ações corretivas sejam tomadas antes que os danos se agravem (Zhong-ji; Zhiqiang; Yan-Bin 2012).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, identificamos a evolução das gerações de manutenção, passando pela manutenção corretiva, preventiva, preditiva e, finalmente, proativa, conforme apontado por Kardec e Nascif (2009), Santos (2013) e Barboza (2018). A manutenção corretiva atua após a ocorrência de uma falha, enquanto a manutenção preventiva é realizada com o objetivo de reduzir a possibilidade de falhas ou quedas no desempenho, seguindo um plano de manutenção pré-estabelecido. A manutenção preditiva utiliza técnicas de análise para prever possíveis falhas, e a manutenção proativa se antecipa a problemas para manter a integridade dos sistemas e equipamentos (Machado et al., 2008; Kardec e Nascif, 2009; Costa, 2013; Santos, 2013; Benício, 2017; Barboza, 2018).

No contexto da manutenção de aeronaves, as manutenções preventiva e preditiva baseadas em HT, apesar de eficientes, podem resultar em altos custos operacionais devido à manutenção excessiva. Em contrapartida, a manutenção CBM (Condition-Based Maintenance) contribui para melhorias contínuas na produção e aumenta a confiabilidade e a segurança das aeronaves (Machado et al., 2008; Benício, 2017; Bevictori e Alves, 2017; Verhagen et al., 2023; Batista e Monteiro, 2024). O plano de manutenção de aeronaves desempenha um papel fundamental ao assegurar a aeronavegabilidade contínua ao longo da vida útil das aeronaves (Levandowski, 2013).

A manutenção preditiva, apoiada por sistemas de monitoramento, antecipa problemas ou falhas em componentes críticos, como motores e rotores, permitindo intervenções planejadas e colaborando para a segurança e confiabilidade das aeronaves (Cortes e Albuquerque, 2009; Pessanha, 2017). A substituição de componentes antes que falhem minimiza o risco de acidentes, reduz custos operacionais e mantém as aeronaves em operação até o momento necessário para a manutenção, aumentando a eficiência operacional (Cortes e Albuquerque, 2009; Pessanha, 2017).

Exemplos de sistemas avançados de monitoramento em tempo real, como o Smart Link Plus, destacam a importância do diagnóstico preditivo, que otimiza a vida útil dos componentes, reduz custos operacionais e de manutenção, previne incidentes e acidentes, aumenta a disponibilidade da aeronave e reduz a carga de trabalho da tripulação (Cortes e Albuquerque, 2009; Pessanha, 2017). Esses sistemas utilizam sensores e algoritmos de análise de dados para coletar informações em tempo real, permitindo diagnósticos precisos e manutenções programadas de forma ideal, minimizando o tempo de inatividade e garantindo condições operacionais ideais (Cortes e Albuquerque, 2009; Pessanha, 2017).

A combinação dessas tecnologias com um planejamento estratégico de manutenção resulta em operações mais ágeis e orientadas por dados, reduzindo custos operacionais e melhorando a experiência do cliente ao garantir voos sem atrasos ou cancelamentos inesperados (Cortes e Albuquerque, 2009; Pessanha, 2017). A manutenção preditiva, fundamentada no uso de dados em tempo real, eleva a segurança das operações e contribui para uma operação mais econômica, minimizando riscos e promovendo um ambiente operacional seguro e eficiente (Cortes e Albuquerque, 2009; Pessanha, 2017).

Este trabalho teve como objetivo analisar os benefícios da manutenção preditiva e proativa e o papel das tecnologias de monitoramento em tempo real no setor aéreo. Foi necessário contextualizar a manutenção geral e em aeronaves, além de identificar as contribuições dessas práticas para o setor aéreo e os sistemas de monitoramento em tempo real. Com base na pesquisa desenvolvida, evidenciamos que a manutenção aeronáutica tem se tornado cada vez mais tecnológica e proativa, impulsionada pela necessidade de aumentar a segurança e a eficiência operacional. O advento de sistemas de monitoramento em tempo real, como o HMS e o CM, destaca a importância de uma abordagem preditiva e preventiva para assegurar que problemas e falhas sejam identificados e tratados antes de comprometerem a segurança e a operação das aeronaves.

Diante desse cenário, conclui-se que a implementação de tecnologias de monitoramento avançado é essencial para o futuro da aviação. Estas tecnologias não representam apenas uma vantagem operacional, mas sim uma exigência crítica para empresas que buscam maximizar a segurança, a eficiência e a competitividade de suas frotas.

Para estudos futuros, recomenda-se aprofundamentos por meio de estudos de caso sobre a manutenção de aeronaves voltada para a engenharia de manutenção, uma área dedicada ao estudo da modernização das tecnologias utilizadas em manutenção.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462: confiabilidade e mantabilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

BARBOZA, T. L. Um histórico da manutenção e conceitos sobre sua função. **Revista Marítima Brasileira**, v. 138, n. 10/12, 2018. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/revistamaritima/article/view/173>. Acesso em: 30 set. 2024.

BATISTA, I. S.; MONTEIRO, R. F. Filosofia on condition: melhoria na confiabilidade e disponibilidade da frota. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, [S.

l.], v. 4, n. 3, p. 159–182, 2024. Disponível em:
<https://rbac.cia.emnuvens.com.br/revista/article/view/252>. Acesso em: 30 set. 2024.

BENÍCIO, L. P. S. **Manutenção, sua conceituação e contexto histórico**: aplicação de algumas técnicas em motores elétricos. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18782>. Acesso em: 20 set. 2024.

BEVICTORI, L. F. N.; ALVES, A. F. Análise comparativa das filosofias de manutenção Hard Time e On Condition: um estudo de caso sobre suas aplicações no motor PW127G. **Interação — Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 201–214, 2019. DOI: 10.33836/interacao.v19i1.127. Disponível em:
<https://periodicos.unis.edu.br/interacao/article/view/127>. Acesso em: 30 set. 2024.

BOMBARDIER. **Smart Link Plus**: Aircraft Health Monitoring System. 2024. Disponível em: <https://bombardier.com/en/support/enhance-your-aircraft/smart-link-plus>. Acesso em: 30 set. 2024.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. **Manual de Manutenção, Doutrina, Processos e Documentação de Manutenção**: MCA 66-7. Rio de Janeiro, 2014.

CORTES, R. G. ; ALBUQUERQUE R. M. Health monitoring systems para segurança de voo. **Dédalo: Revista de segurança de voo da aviação do Exército**, n. 12, p. 9-13, nov. 2009.

COSTA, M. A. **Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

KABASHKIN, I.; PEREKRESTOV, V.; TYNCHEROV, T. SHOSHIN, L.; SUSANIN, V. Framework for Integration of Health Monitoring Systems in Life Cycle Management for Aviation Sustainability and Cost Efficiency. **Sustainability**, [S.l.], v. 16, n. 14, p. 6154, 18 jul. 2024. MDPI AG. DOI: 10.3390/su16146154.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção**: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

LEVANDOWSKI, N. C. Manutenção de aeronaves do transporte aéreo brasileiro – Da teoria à prática. **Revista da Graduação**, [S. l.], v. 6, n. 1, 2013. Disponível em:
<https://revistaseletronicas.pucrs.br/graduacao/article/view/13758>. Acesso em: 30 set. 2024.

MACHADO, M. C.; URBINA, L. M. S.; ELLER, M. A. G. Manutenção Aeronáutica no Brasil: distribuição geográfica e técnica. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 2, p. 243–253, abr. 2015. DOI: 10.1590/0104-530X1031.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. São Paulo: Egard Blücher, 1989.

PEREIRA, G. G. O.; OLIVEIRA, A. **Manutenção Preventiva: os Benefícios da Manutenção Preventiva**. 2022. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) — Faculdade Anhanguera de Taubaté, Taubaté, 2022. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/57605/1/GABRIEL_GUIDO_OLIVEIRA_PEREIRA.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.

PESSANHA, C. E. N. O M'ARMS e a Manutenção Preditiva – uma ferramenta valiosa para a segurança de voo. **Revista da Aviação Naval**, v. 47, n. 77, p. 25, 2017. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/aviacaonaval/article/view/2773>. Acesso em: 30 set. 2024.

PWC. **Predictive Maintenance 4.0 – Beyond the Hype**: PdM delivers results. 2018. Disponível em: <https://www.pwc.be/en/documents/20180926-pdm40-beyond-the-hype-report.pdf>. Acesso em: 30 set. 2024.

ROSEMBERG, B. **Product Focus: HUMS**. Avionics International. 1 fev. 2010. Disponível em: <https://www.aviationtoday.com/2010/02/01/product-focus-hums/>. Acesso em: 30 set. 2024.

SANTOS, F. M. C. **Manutenção preditiva e pró-ativa: filosofias alternativas ou complementares: estudo de caso**. 2013. Tese (Doutorado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/3077>. Acesso em: 30 set. 2024.

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**, [S.l.], v. 10, n. 9, p. 762, 28 ago. 2023. DOI: 10.3390/aerospace10090762.

ZHONG-JI, T.; ZHIQIANG, Z.; YAN-BIN, S. The Overview of the Health Monitoring Management System. **Physics Procedia**, [S.l.], v. 33, p. 1323-1329, 2012. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.05.218.

BIODADOS

Bruno Alves dos Santos

Natural de Goiânia-GO, concludente do curso de Ciências Aeronáuticas pela PUC-GO.

E-mail: brruunoo60@gmail.com