



Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas

Artigos

FILOSOFIA *ON CONDITION*: MELHORIA NA CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE DA FROTA

Isabella Sabino Batista¹

Raul Francé Monteiro²

RESUMO

A filosofia *On Condition* (OC) emerge como uma abordagem promissora para melhorar a disponibilidade, os custos e a confiabilidade da manutenção das frotas aéreas. Este estudo explora as vantagens desse conceito, salientando seu foco na substituição de componentes com base em condições reais durante paradas operacionais das aeronaves, em vez de intervalos substanciais de tempo predefinidos, que levam, em alguns casos, a remoções desnecessárias de sistemas ou componentes. Para expor as vantagens dessa filosofia, foi adotada a pesquisa de abordagem qualitativa-quantitativa, com procedimentos bibliográficos, documentais e estudo comparativo. Entre os resultados, verificou-se que os custos operacionais relacionados à filosofia *Hard Time* (HT) são mais altos que os associados à OC e que os equipamentos ficam inativos por um tempo maior durante a realização das revisões. Além disso, apurou-se que falhas na execução da manutenção ocupam a sétima posição entre os fatores contribuintes de ocorrências aeronáuticas no Brasil nos últimos 10 anos. Diante dessa análise, ao se utilizarem da OC, as operadoras aéreas tendem a reduzir suas despesas, associando, ainda, uma manutenção preventiva à redução do tempo de indisponibilidade de suas aeronaves. Além disso, a implementação de sistemas responsáveis pelo monitoramento e diagnóstico proporcionam uma avaliação contínua da saúde dos componentes, permitindo intervenções precisas e oportunas, o que traz mais segurança para toda a frota. Ao destacar os benefícios da filosofia OC, este estudo busca contribuir para que as operadoras aéreas aprimorem a eficiência e a confiabilidade de suas aeronaves.

Palavras-chave: Manutenção; *on Condition*; confiabilidade; disponibilidade; aeronaves.

¹ Graduanda em Ciências Aeronáuticas, Pontifícia Universidade Católica de Goiás. E-mail: isabella.sabatista@gmail.com

² Mestre em Psicologia e Especialista em Docência Universitária pela Universidade Católica de Goiás. Professor da Escola Politécnica e de Artes da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Piloto de Linha Aérea – Avião, EC-PREV pelo CENIPA e credenciado SGSO pela ANAC. E-mail: cmterfrance@hotmail.com

ON-CONDITION PHILOSOPHY: IMPROVED FLEET RELIABILITY AND AVAILABILITY

ABSTRACT

On-Condition (OC) maintenance emerges as a promising approach to improve the availability, costs, and reliability of aircraft fleet maintenance. This study explores the advantages of this concept, highlighting its focus on replacing components based on real conditions during aircraft operational shutdowns, instead of substantial predefined time intervals, which lead, in some cases, to unnecessary removals of systems or components. To expose the advantages of this philosophy, a qualitative-quantitative approach research was adopted, with bibliographic, documentary procedures, and comparative study. Among the results, it was found that the operational costs related to the Hard Time (HT) philosophy are higher than those associated with OC one and that the equipment is inactive for a longer period during the inspections. In addition, it was found that failures in the execution of maintenance occupy the seventh position among the contributing factors of aeronautical occurrences in Brazil in the last 10 years. Given this analysis, by using OC, airline operators tend to reduce their expenses, also associating preventive maintenance with reducing the downtime of their aircraft. In addition, the implementation of systems responsible for monitoring and diagnosis provide a continuous assessment of the health of the components, allowing precise and timely interventions, which brings more safety to the fleet. By highlighting the benefits of the OC philosophy, this study seeks to contribute to the improvement of the efficiency and reliability of aircraft by airline operators.

Keywords: Maintenance; on Condition; reliability; availability; aircraft.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção técnica de aeronaves é vital para a segurança e o desempenho do voo, pois previne e corrige problemas sistêmicos ou mecânicos da máquina. No entanto, os sistemas ou componentes não apresentam taxas de falha uniformes, pois, com o tempo de uso, ocorre o aumento da entropia¹ dos sistemas e a sua indisponibilidade, causada principalmente por defeitos ou problemas (Ribeiro, 2009). Diante dessa realidade, a perda da confiabilidade dos sistemas e a indisponibilidade dos aviões tornam-se um desafio para as malhas das operadoras aéreas que buscam a minimização dos custos, a maximização do funcionamento de aeronaves e equipamentos e a garantia aos seus usuários do cumprimento seguro do serviço de transporte.

Nesse contexto, a filosofia OC se apresenta como um método preventivo que envolve monitorar e inspecionar periodicamente um ou outro item baseado em pequenas dúvidas, com o intuito de verificar se ele pode continuar em uso, com base em padrões físicos específicos, como limites de desgaste ou deterioração (Kinniston, 2004). Em outras palavras, a OC visa acompanhar a condição de funcionamento dos componentes e sistemas, bem como sua deterioração, possibilitando uma atuação preventiva, o que eleva a utilização dos componentes em seu máximo potencial.

Partindo dessas premissas, esse estudo tem como objetivo evidenciar as melhorias alcançadas por meio da implementação da filosofia OC, analisando, ainda, os seus custos e comparando-os aos do processo HT. Para alcançar o objetivo proposto, a pesquisa, de natureza básica e enfoque teórico, adota uma abordagem indutiva, com métodos qualitativo-quantitativos, utilizando-se de procedimentos bibliográficos, documentais e estudo de comparativo. As principais fontes empregadas compreenderam livros e artigos hospedados no Google Acadêmico, além de documentos nacionais da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

¹ Entropia é um conceito da termodinâmica que mede a desordem das partículas de um sistema físico (Enciclopédia Significados, s. d.).

(CENIPA) e do Comando da Aeronáutica (COMAER) e internacionais, publicados pela *International Civil Aviation Organization* (ICAO), pela *Federal Aviation Administration* (FAA) e pelo *Naval Air Systems Command* (NAVAIR).

Para organizar a linha argumentativa, o texto foi dividido em quatro seções, além desta introdutória. A próxima seção – revisão teórica – discute a evolução das práticas de manutenção aeronáutica, a apresentação e o desenvolvimento dos conceitos associados e os princípios da filosofia OC. Em seguida, são apresentados os procedimentos metodológicos adotados no estudo. Após, é feita a exposição dos resultados, seguidos de sua discussão. Na última seção, apresentam-se as considerações finais.

A partir dos conteúdos discutidos, será possível identificar se a adoção da filosofia OC pode configurar uma abordagem potencialmente viável para mitigar os desafios associados à parada do avião para manutenção. Isto porque a filosofia OC se baseia nas condições do equipamento e na identificação de possíveis falhas, de modo preventivo. Esta abordagem pode substituir manutenções que exijam a remoção das partes previamente definidas e que, por consequência, demandam maior tempo de inoperabilidade da aeronave.

2 REVISÃO TEÓRICA

A manutenção de uma aeronave é essencial para garantir voos confiáveis e em conformidade com os padrões de segurança da aviação (Kinniston, 2004). Porém, na manutenção de abordagem conservadora, para obter a confiabilidade do sistema, em muitos casos, ocorre a substituição prematura de componentes, o que resulta em custos elevados (Côrrea e Dias, 2016). De acordo com Ramalho (2013), somente a inspeção de motores representa 36% dos gastos de toda a atividade de manutenção.

Por certo, a manutenção das aeronaves apresenta desafios significativos e complexos em relação ao seu planejamento, eficácia operacional, despesas, disponibilidade de peças e prontidão de suporte adicional (Bohrey; Chatpalliwar,

2024). Ademais, falhas na manutenção, segundo dados do CENIPA (2024), podem atuar como fatores contribuintes de ocorrências aeronáuticas.

Sabendo-se, portanto, da relevância das manutenções para a segurança das operações aéreas e, por outro lado, do custo envolvido, houve a necessidade de evolução das tecnologias voltadas à manutenção em paralelo ao avanço das tecnologias de construção das aeronaves. Assim, surgiram novos conceitos voltados para esse serviço com o objetivo de maximizar a segurança de voo e a disponibilidade² das aeronaves, além de minimizar os custos de manutenção e inspeção (Weber, 1980). Entre os novos conceitos, emergem as filosofias de manutenção, com destaque para a *Hard Time*, a *On Condition* e a *Condition Monitoring*, cujo propósito é o de orientar os programas específicos de cada unidade, a saber, sistemas, componentes e aparelhos.

2.1 MANUTENÇÃO AERONÁUTICA: CONCEITO E BASES NORMATIVAS

O termo manutenção começou a ser utilizado na Europa Central no início do século XVI, com o surgimento dos relógios mecânicos e, conseqüentemente, dos primeiros técnicos especializados em montagem e assistência. A atividade ganhou consistência durante a Revolução Industrial e, posteriormente, firmou-se no período pós Segunda Guerra Mundial, quando países envolvidos no conflito ancoraram seu desempenho industrial na engenharia e na manutenção (Telecurso 2000, 2014). Ao longo de sua história, a manutenção de objetos e máquinas esteve presente em diferentes segmentos de transporte (ferrovias, automóveis etc.), sendo não menos importante para o desenvolvimento da aviação.

No início do século XX, homens tentavam de muitas formas alçar voo por intermédio de um veículo mais pesado que o ar, o avião. Nesta busca, alguns

² Disponibilidade (Availability) de uma aeronave é definida como a condição em que todas as manutenções necessárias foram realizadas e a aeronave está em condições de voo, conforme definido pelas regulamentações. Quando uma aeronave está programada para manutenção (aquelas planejadas com antecedência e executadas de acordo com um cronograma específico) ou não está disponível devido a manutenção não programada (que ocorrem de maneira inesperada devido a falhas ou problemas que surgem durante as operações), ela não pode realizar voos comerciais. A disponibilidade da aeronave é medida com base em uma porcentagem de dias (Sutaria, 2018).

entusiastas surgiram com o propósito de superar esse desafio, entre eles Alberto Santos-Dumont, Wilbur e Orville Wright, que ficaram mundialmente conhecidos (Lemos, 2012). Concomitantemente ao desenvolvimento do avião, outros estudiosos se destacaram na construção e manutenção do motor criado para o avião, sendo, um exemplo deles, Charles E. Taylor, em 1903 (Papageorgio, s.d.).

Com o desenrolar das Primeira e Segunda Guerras Mundiais, a aviação se transformou em arma, cujos investimentos dos Estados envolvidos impulsionaram uma aceleração tecnológica que contribuiu diretamente para o desenvolvimento das aeronaves, alterando seu alcance, sua autonomia, seu potencial destrutivo e outros aspectos relevantes (Schramm, 2019).

Para corresponder a essas expectativas, foi necessário desenvolver e qualificar a manutenção aeronáutica em prol da segurança das operações e da vida útil do material envolvido. Essa perspectiva se confirma na definição de manutenção estabelecida pelo COMAER (2004):

Função logística que tem por encargo preservar o material para mantê-lo em serviço, restituir suas condições de utilização em caso de deterioração, prover a máxima segurança em sua operação e estender sua vida útil tanto quanto possível (p. 9).

Inicialmente, a manutenção aeronáutica tinha o objetivo único identificar problemas técnicos que levavam à inoperância de várias aeronaves por um intervalo de tempo significativo se comparado às horas voadas (Kinniston, 2004). A *Civil Aviation Authority* (CAA, 2002) ressalta que, devido ao aumento do tráfego aéreo e ao avanço das tecnologias, hoje mais complexas, as pressões sobre a capacitação dos técnicos de manutenção cresceram, uma vez que um equívoco na execução de uma tarefa até mesmo simples pode causar danos. Essa busca por profissionais e manutenção adequados também é uma preocupação da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI)³, desde o início de sua atuação.

Com efeito, a partir da criação da OACI, em 1944, organização encarregada de regular a aviação civil em âmbito mundial, foram estabelecidas normas, procedimentos e políticas de apoio para segurança, eficiência e regularidade

³ Ou, em inglês, *International Civil Aviation Organization* (ICAO).

R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 3, p. 159-182, jun/jul. 2024.

aéreas, bem como para sustentabilidade econômica e responsabilidade ambiental (ANAC, 2016). Nos 19 Anexos que compõem a Convenção de Chicago – evento que, entre outras coisas, estabeleceu a criação da OACI – constam aqueles voltados às licenças dos profissionais da aviação civil; às regras do ar; aos serviços de tráfego aéreo; aos aeroportos; à manutenção aeronáutica, entre outros (ANAC, s. d.).

No âmbito nacional, a ANAC, agência que regula a aviação civil no Brasil, à luz do Anexo 8 (Aeronavegabilidade)⁴ da OACI, criou o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (RBAC) de nº 43, Emenda nº 05, o qual implementou regras voltadas à manutenção de aeronaves (ANAC, 2021). A Instrução Suplementar ANAC nº 91.409-001, Revisão B, igualmente discorre sobre a manutenção de aeronaves, prevendo, ainda, o tempo recomendado entre as revisões gerais (ANAC, 2020). Além desses normativos, voltados especificamente para a manutenção aeronáutica, outros documentos também contemplam aspectos desta atividade, como o RBAC nº 121 (ANAC, 2024), destinado às operações do transporte aéreo regular, e o RBAC nº 135 (ANAC, 2023), relacionado aos táxis-aéreos.

2.2 AS TRÊS PRINCIPAIS FILOSOFIAS DA MANUTENÇÃO AERONÁUTICA: HT, OC E CM

O objetivo da manutenção de aeronaves reside em proporcionar um serviço seguro, com custo mais baixo possível e que garanta a disponibilidade do equipamento. Todavia, os gastos associados à essa atividade geralmente representam entre 10 e 20 por cento dos custos operacionais totais. Conseqüentemente, as empresas responsáveis pela execução desse serviço enfrentam pressões para minimizar seus gastos sem comprometer a confiabilidade da atividade (Thilakan *et al.*, 2013). À vista disso, a seleção da filosofia de manutenção assume considerável peso no cenário aeronáutico (Bevictori; Alves, 2019).

⁴ *Annex 8 – Airworthiness of Aircraft*: documento da OACI que trata das questões relacionadas à aeronavegabilidade e à manutenção das aeronaves no contexto da aviação civil (ICAO, 2022).

Já nos primeiros quarenta anos da história da aviação, foi observado que as peças das aeronaves se desgastavam, o que poderia levar a falhas, representando um risco para a segurança de voo. Essa teoria orientou programas de manutenção que consistiam, principalmente, em inspeções previamente agendadas, com base no tempo de voo da aeronave. A menos que evidências de deterioração ou do mau funcionamento fossem observadas, nenhuma ação corretiva era feita. Vale ressaltar que estas revisões consistiam na desmontagem total da máquina (Weber, 1980), indisponibilizando, portanto, o seu uso.

Com o passar dos anos, as autoridades nacionais e internacionais responsáveis pela regulação da aviação passaram a exigir um programa de manutenção para cada modelo de aeronave (CIAVEX, 2012). Esses programas são compostos por trabalhos de manutenção, manutenção preventiva, modificações e reparos realizados com o intuito de garantir a aeronavegabilidade continuada (ANAC, 2023; ANAC, 2024). A base da execução desses programas engloba três filosofias de manutenção que podem ser empregadas: *Hard Time*, *On Condition* e *Condition Monitoring*.

A *Hard Time* ou HT, primeira a ser utilizada na aviação, surgiu logo após a Segunda Guerra Mundial, em complemento ao modelo de manutenção utilizado à época, que não considerava o fator econômico como um aspecto importante para a manutenção (Weber, 1980). Segundo Dinis (2009), a HT consiste em uma manutenção preventiva sistemática determinada em função do vencimento de um prazo especificado ou pré-estabelecido, condicionado a certo número de horas de voo. Em outros termos, a HT indica, nos dizeres de Kinniston (2004), a remoção de um item em um intervalo predeterminado.

Assim, ao adotar a HT, o trabalho dos mecânicos é dividido em grupos eficientes de tarefas realizadas periodicamente, em intervalos fixos de tempo denominados TBO⁵ (Weber, 1980). Vale ressaltar que o COMAER (2004, p. 12) define TBO como o “tempo entre duas revisões gerais consecutivas – o prazo de

⁵ *Time Between Overhaul*/Tempo [de horas de voo] entre revisões gerais.

utilização média estabelecida pelo fabricante e ratificada ou modificada pelos PARQUES-CENTRAIS e PARQUES-OFICINAS”.

De acordo com Dinis (2009), na HT, o prazo para as revisões sistemáticas é preestabelecido de acordo com o potencial do componente, ou seja, o fim de seu tempo de vida útil, ponto a partir do qual o risco de desgaste e avarias aumenta. Para Bevictori e Alves (2019), normalmente a HT é aplicada em motores aeronáuticos com pelo menos duas intervenções de desmontagem durante as manutenções. A primeira desmontagem, chamada de “inspeção da seção quente” (HSI)⁶, geralmente é realizada na metade do limite de tempo preestabelecido para a revisão, enquanto a segunda é a própria revisão geral.

Já a filosofia *On Condition* ou OC, segundo Weber (1980), foi adicionada como conceito pouco depois da HT, entre os anos 1950 e 1960, resultado das observações de que algumas falhas em potencial podiam ser detectadas em inspeções regulares acerca da condição de alguma peça.

A primeira aplicação em larga escala da OC foi em 1964, quando uma companhia aérea foi confrontada pela necessidade de revisão programada em mais de 100 controles e atuadores hidráulicos, prevista em um programa de manutenção HT aprovado pela FAA. Na ocasião, e a partir de um estudo cuidadoso, essa revisão levou a uma abordagem preventiva nos moldes da OC (NAVAIR, 1980). Weber (1980) definiu a filosofia OC como:

O processo de manutenção no qual é possível a verificação e o acompanhamento das condições físicas e/ou funcionais das peças enquadradas neste sistema enquanto elas permanecem instaladas na aeronave. Os componentes mantidos sob condição somente são removidos da aeronave quando for constatada uma deterioração de seus parâmetros críticos além dos limites previstos pelos respectivos manuais e/ou especificações do setor de Engenharia de Manutenção, ou em caso de falha (p. 81).

Assim, a filosofia OC é a que se utiliza de inspeções repetitivas ou testes, com a finalidade de deliberar a condição das unidades, sistemas ou partes estruturais e, assim, determinar se estão aptos à operação. É considerada, portanto, uma manutenção preventiva que aborda as unidades individuais, antes

⁶ *Hot Section Inspection/Inspeção da seção quente.*

que ocorram falhas (Weber, 1980). Em adição, Bevictori e Alves (2019) entendem que, pelo fato de a OC basear-se na avaliação do funcionamento de determinado componente sem necessariamente exigir sua retirada, tal característica a torna atrativa, pois posterga a inoperabilidade do equipamento.

Aqui é oportuna uma comparação com a filosofia HT. Nesta, com a expiração das horas de voo entre as TBOs, a aeronave ou seu motor são encaminhados para revisão. Cabe ressaltar que a duração do TBO é determinada por estimativas, negligenciando as cargas mecânicas e térmicas reais, ou seja, a necessidade efetiva de tal procedimento. Em uma análise minuciosa feita por Siladic e Rasuo (2009) no motor RD-33 de caças MIG-29, os pesquisadores engenheiros concluíram que as limitações do TBO determinadas pela fabricante se referiam, em média, a apenas 65% da vida útil do equipamento, sugerindo que os motores inspecionados na revisão geral possuíam uma reserva considerável de vida útil que não fora gasta. Isto pode ser detectado ao aplicar a filosofia OC.

Após a introdução dos motores a jato, durante a década de 1960, surgiram novos objetivos para a manutenção, tais como aumentar a confiabilidade de sistemas e componentes e, ao mesmo tempo, assegurar uma operação econômica. Para cumprir esses objetivos, foi necessário estabelecer tarefas para a manutenção, denominada *Condition Monitoring* (CM) (Weber, 1980), filosofia empregada para monitorar equipamentos que não utilizam a HT e a OC. Os itens na 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 (Kinnison, 2004).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo aborda, qualitativa e quantitativamente, o impacto da filosofia OC na manutenção aeronáutica sobre a confiabilidade e disponibilidade da frota de empresas aéreas em geral. A pesquisa é classificada como básica, de procedimentos bibliográficos, documentais e estudo comparativo. Como fontes,

foram utilizados livros e artigos hospedados no Google Acadêmico, além de publicações e documentos nacionais da ANAC e do COMAER, assim como internacionais da ICAO, da FAA e da NAVAIR.

São objetos da pesquisa os índices do ocorrências aeronáuticas no Brasil que tiveram, entre seus fatores contribuintes, a manutenção de aeronaves, registrados pelo CENIPA (Painel SIPAER) entre 2014 e maio de 2024; fatores que levam à inatividade do avião; o plano de manutenção preventivo; e dois estudos relacionados à aplicação da filosofia OC.

4 RESULTADOS

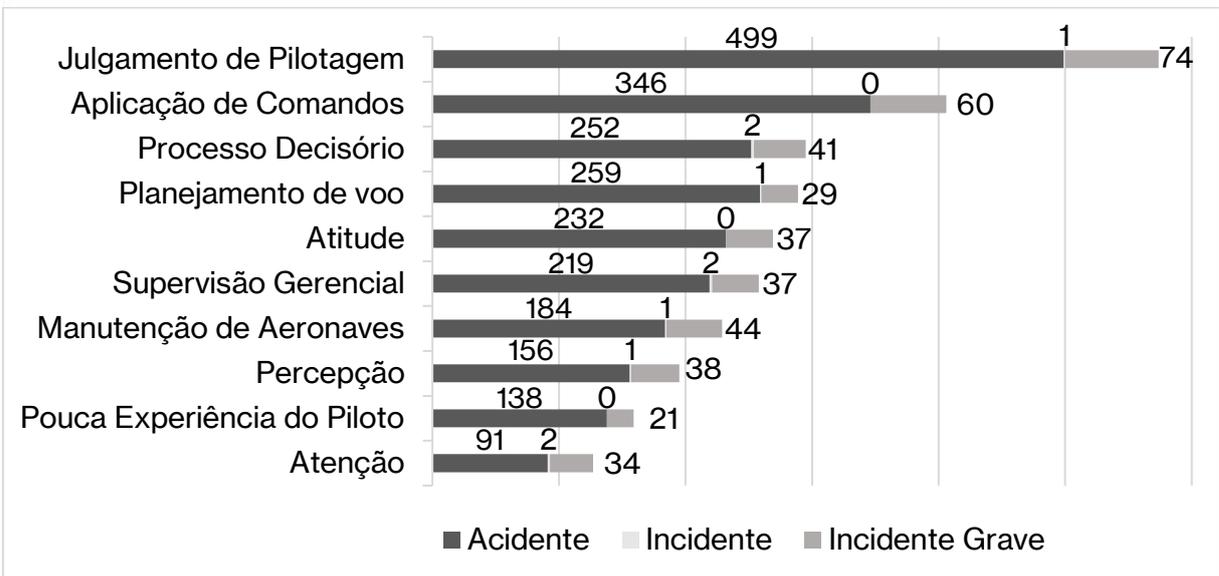
4.1 PANORAMA SOBRE AS OCORRÊNCIAS AERONÁUTICAS NO BRASIL

A análise das ocorrências aeronáuticas⁷ brasileiras na última década, entre 2014 e maio de 2024, disponibilizadas pelo Painel SIPAER (CENIPA, 2024), verificou que foram registrados 1.633 acidentes, 4.868 incidentes e 713 incidentes graves. Também por intermédio dos dados do Painel, foi possível elencar os dez fatores contribuintes que mais estiveram presentes nas ocorrências aeronáuticas, bem como os seus valores em números. O Gráfico 1 a seguir exibe esses números:

ISSN 2763-7697

⁷ Estão incluídos nesses dados todos os tipos de operação (aerodesportiva, agrícola, especializada, experimental, instrução, não regular, policial, e de aeronaves, privada, regular e táxi aéreo) e todos os tipos de aeronaves (avião, helicóptero, planador etc.).

Gráfico 1 – Panorama sobre as ocorrências aeronáuticas nacionais (2014 a 20 de maio de 2024)



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados extraídos do CENIPA (2024).

Com base no Gráfico 1, é possível constatar que o “Julgamento de Pilotagem” é o fator contribuinte que mais afetou as ocorrências aeronáuticas no Brasil nos últimos 10 anos, presente em 574 dos casos (499 acidentes; 1 incidente; e 74 incidentes graves). Entretanto, nota-se, entre os dez principais fatores, a participação da “Manutenção de Aeronaves” em 184 acidentes, 1 incidente e 44 incidentes graves, o que a posiciona em sétimo lugar na lista dos fatores mais frequentes.

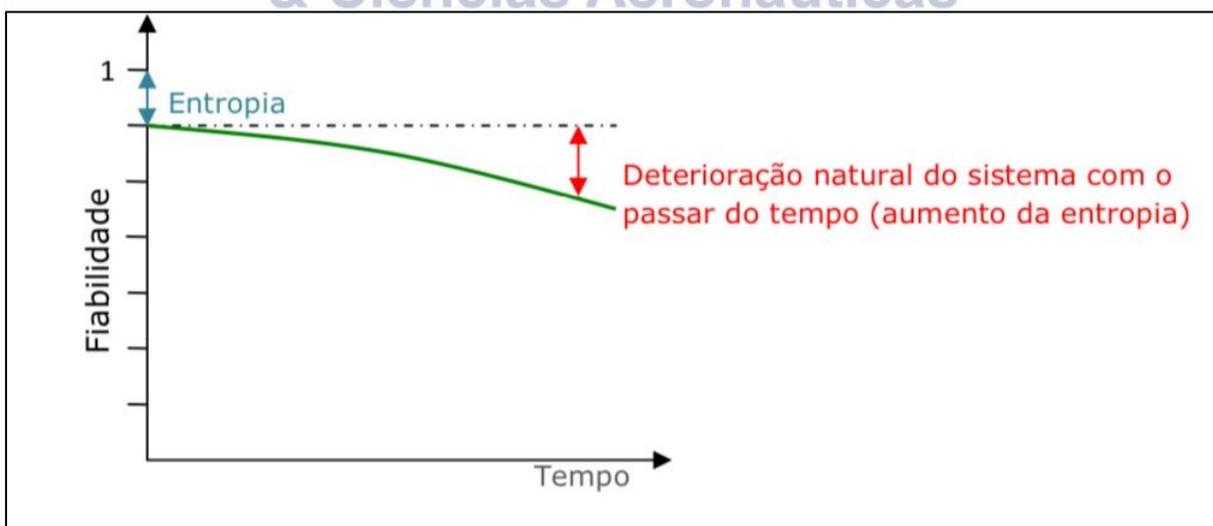
Ao verificar os tipos de ocorrências aeronáuticas no período registradas para o fator “Manutenção de Aeronaves”, constata-se que a “falha ou mau funcionamento do motor” soma 109 casos, dos quais 99 foram acidentes e 10 incidentes graves. Verificou-se, ainda, que a “falha ou mau funcionamento de sistema ou componente” computou 59 ocorrências, assim divididas: 37 acidentes e 22 incidentes graves.

4.2 A IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO DO MOTOR E SEUS SISTEMAS PARA EFEITOS DE AERONAVEGABILIDADE E DISPONIBILIDADE DA AERONAVE

Como se confirmou a partir dos dados do CENIPA (2024), as falhas ou mau funcionamento do motor e do sistema ou de seus componentes podem levar a ocorrências aeronáuticas. Por esta razão, há uma necessidade de monitorar o motor aeronáutico e seus elementos com vistas a evitar tais falhas.

Nesse sentido, o método OC é relevante para identificar desgastes ou deterioração das peças de modo preventivo, uma vez que nessa abordagem as verificações devem incluir a medição ou avaliação do desgaste e/ou deterioração do item. Seu processo também abrange a coleta periódica de dados que irá revelar a condição física de um componente, sistema ou motor. Mediante análise e avaliação, os dados da condição devem ser capazes de determinar a aeronavegabilidade contínua e/ou a deterioração da resistência a falhas e a sua iminência (Kinniston, 2004). A deterioração natural de um sistema pode ser observada no Gráfico 2 a seguir:

Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas
Gráfico 2 – Deterioração natural de um sistema



Fonte: Ribeiro (2009, p. 8).

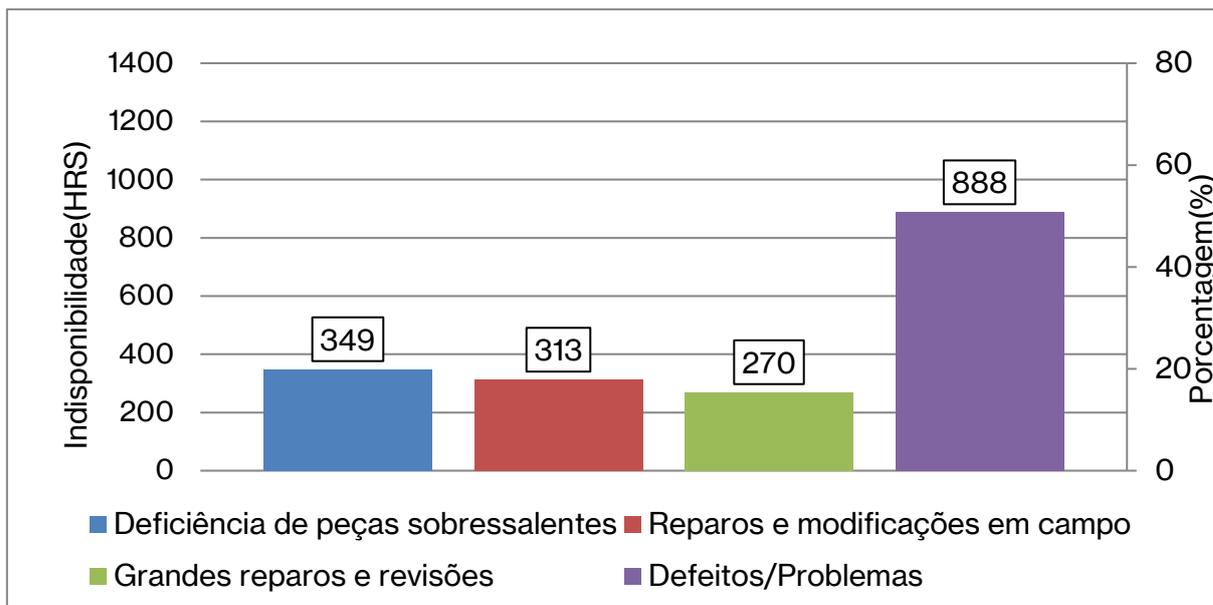
De acordo com o Gráfico 2, há um declínio da confiabilidade de sistemas em razão do tempo de uso. Essa entropia é uma realidade presente em todos os sistemas, tendendo sempre a aumentar com o tempo, resultado de sua deterioração natural, o que reduz a confiabilidade. Para manter níveis aceitáveis de confiabilidade, é necessária manutenção, com finalidade de restaurar a ordem e a funcionalidade do sistema (Ribeiro, 2009).

A consequência da manutenção, por certo, levará à parada da aeronave e à sua indisponibilidade para operar, para que esta possa passar por reparos, revisões e substituição de peças. Sobre os efeitos danosos dessa indisponibilidade, estudos de Bohrey e Chatpalliwar (2024) compilaram dados de uma situação ideal sobre a disponibilidade máxima (100%) de 18 aeronaves. Na hipótese de que cada aeronave realize, em um mês, voos de 20 horas de duração, ao final de um ano o total de horas disponíveis produzidas pelas 18 aeronaves é de 4.320 (12x20x18). Todavia, no contexto real, se em um ano específico registraram-se 1.820 horas de inatividade, isto significa que das 4.320 horas possíveis de voo, apenas 2.500 foram de fato efetivadas, o que representa 57,87% de disponibilidade e 42,13% de indisponibilidade em uma manutenção convencional.

O mesmo estudo elencou os principais fatores que levam à indisponibilidade de uma aeronave, demonstrados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Fatores responsáveis pelo tempo de indisponibilidade da aeronave em manutenção





Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de Bohrey e Chatpalliwar (2024).

Com base no Gráfico 3, os principais fatores que podem levar à indisponibilidade da aeronave pelas 1.820 horas anuais apuradas no estudo dos autores citados são os relacionados: à deficiência de peças sobressalentes; a reparos e modificações em campo; a grandes reparos e revisões; e a defeitos/problemas de peças. Nota-se que este último é o maior responsável pela inatividade de um avião, levando-o ficar parado por cerca de 888 horas, o que corresponde a 48,79% do total de indisponibilidade (Bohrey; Chatpalliwar, 2024).

Liang e Chaovalitwongse (2009) acrescentam que a maximização da disponibilidade das aeronaves durante as operações e a minimização dos custos associados à manutenção são desafios significativos enfrentados por companhias aéreas. A falha em gerenciar esses desafios de forma eficaz pode resultar em consequências adversas, como ocorrência de atrasos nos voos, aplicação de multas regulatórias e adoção de práticas de manutenção ineficientes, as quais podem comprometer a segurança das operações aéreas, complementam os autores.

4.3 ESTUDOS RELACIONADOS À APLICAÇÃO DA FILOSOFIA OC

A primeira aplicação em grande escala da filosofia OC ocorreu em companhia aérea em consequência de um estudo realizado pelo NAVAIR, em 1980, que se baseou na funcionalidade e confiabilidade dos equipamentos de uma aeronave em situações de falhas das válvulas hidráulicas. Os engenheiros concluíram que, mesmo predominando a falha das válvulas hidráulicas, seria viável isolar cada subsistema utilizando as válvulas manuais. Com a aplicação da filosofia OC, puderam estabelecer níveis aceitáveis de vazamento interno para cada subsistema e, caso o vazamento fosse considerado excessivo, isolar as unidades defeituosas para substituição. Isso resultaria na retirada de menos de 10% das unidades, mantendo a confiabilidade dos sistemas.

A partir da natureza preventiva da OC, Bevictori e Alves (2019) fizeram uma análise comparativa da filosofia HT e a OC no motor PW127G, instalado em aeronaves C-295, da fabricante Airbus. Neste estudo, os pesquisadores consideraram que a revisão geral de cada motor deveria ocorrer após 6.000 horas de operação, enquanto a HSI (inspeção de seção quente) aconteceria após 3.000 horas. Para comparar os custos entre a inspeção HSI e a inspeção OC, os autores criaram unidades monetárias⁸ cujos valores são referentes ao custo da HSI. Tais valores podem ser observados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Execução orçamentária amostral

Motores PW127G/números de série que passaram por HSI	Ano	Valor em unidade monetária de referência (UMR)
Motores 2076 e 2096	2012	31,6
Motor 2075	2013	20,0
Motor 2090	2013	21,1
Motor 2051	2013	21,3
Motor 2086	2013	21,5
Motor 2095	2013	16,9
Motor 2077	2013	21,2
Motor 2094	2013	17,0
Motor 2117	2013	17,8
Motor 2130	2014	27,2
Motores 2118 e 2119	2016	65,3
		Custo total: 280,9

⁸ Unidades monetárias criadas pelos autores mediante consulta nos registros de execução do contrato, não mencionando valores reais investidos, unicamente com o fim da identificação comparativa dos custos (Bevictori; Alves 2019).

Fonte: adaptada de Bevictori e Alves (2019).

A Tabela 1 elenca 13 motores PW127G identificados por seus números de série, o ano em que cada um passou pela inspeção de seção quente (que ocorre a cada 3.000 horas de voo, como já explanado) e os valores em unidade monetária de referência utilizados pelos autores, relativos aos custos dessas inspeções. Após todas as inspeções executadas, o custo total da HSI foi de 280,9 UMR.

Noutra ponta, a aplicação da filosofia OC, como não requer intervenção pré-programada na seção quente, não terá esse custo de 280,9 (UMR) da HSI após 3.000 horas de operação. O custo na OC nesta fase envolverá o uso de uma plataforma de monitoramento dos motores, denominada WebECTM⁹, na qual os dados são depositados e tratados para que, em seguida, seja realizado o monitoramento e determinada a condição real do motor, sem a necessidade de retirá-lo da aeronave. O valor estimado para implementação dessa plataforma é de 80,4 (UMR) (Bevictori; Alves 2019), evidenciando uma economia de 200,5 UMR em relação à filosofia HT, o que representa cerca de 70% de redução nos custos de inspeção/monitoramento.

Os autores concluem, assim, que a utilização da filosofia OC como alternativa à HT permite a utilização máxima das peças, alcançando – ou até mesmo ultrapassando – o limite de horas previsto na revisão geral da HT (6.000 horas de operação), sem a necessidade de realizar uma HSI a cada 3.000 horas de operação.

5 DISCUSSÃO

Certamente, a manutenção desempenha papel fundamental na garantia de aeronavegabilidade, sendo responsável por preservar e recuperar o equipamento para condições operacionais ideais (Thilakan *et al.*, 2013). Na aviação, destaca-se a importância de uma manutenção bem executada, caso contrário, ela poderá estar presente em acidentes, possibilidade confirmada pelos dados CENIPA

⁹ *Engine Condition Trend Monitoring (ECTM)*/Monitoramento de tendências de condição do motor. R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 4, n. 3, p. 159-182, jun/jul. 2024.

(2024) que classificou o fator contribuinte “Manutenção Aeronáutica” como o sétimo entre os 10 principais fatores de ocorrências aéreas no Brasil ao longo da última década.

Como definida pela COMAER (2004), a manutenção bem desempenhada permite preservar o material, restaurar danos, garantir segurança e prolongar a vida útil do equipamento. Ademais, com base em CIAVEX (2012), as autoridades aeronáuticas requerem um programa de manutenção para cada aeronave. Isso ressalta a necessidade de manutenção de alta qualidade em operações aéreas (Kinniston, 2004) e de profissionais capacitados para evitar a ocorrência de erros humanos nessa atividade (CAA, 2002). De igual modo, Liang e Chaovalitwongse (2009) chamaram atenção para a má gestão desses desafios, que podem acarretar atrasos, multas e práticas de manutenção inadequadas.

Essa preocupação se justifica, conforme elucida Ribeiro (2009), uma vez que o ciclo de vida das aeronaves inevitavelmente sofre deterioração, o que resulta na redução gradual de sua confiabilidade. Nesse sentido, Bohrey e Chatpalliwar (2024) compreendem o envelhecimento das aeronaves como grande responsável pelo aumento das demandas de manutenção, acarretando uma série de desafios, incluindo falhas que afetam a eficiência e a prontidão da aeronave. Além disso, como demonstrado no Gráfico 3, os principais motivos para a falta da disponibilidade dos equipamentos são resultado de defeitos ou problemas que requerem a eficiência da atividade de manutenção a fim de reduzir o tempo de inoperabilidade da frota.

Por isso, segundo Kinniston (2004), as verificações OC têm a responsabilidade de, com análises e avaliações de dados, manter a aeronavegabilidade contínua, identificar a deterioração da resistência e a iminência da falha, determinando o tempo de vida útil restante, ao passo que estabelece a capacidade para um constante desempenho durante o intervalo subsequente das inspeções. Essa perspectiva também foi assimilada no estudo delineado pelo NAVAIR (1980), no qual se apurou que a implementação da OC culminou na retirada de uma proporção inferior a 10% das válvulas, o que preservou a integridade do sistema estudado.

Além disso, na OC ainda se verificam vantagens no aspecto monetário envolvido. Conforme Thilakan *et al.*, (2013), as empresas sofrem uma pressão para as reduzirem seus gastos com manutenção, que representam cerca de 10-20% do total operacional. Mediante a aplicação da filosofia OC, segundo Bevictori e Alves (2019), haverá redução desses custos relacionados à HSI, apresentados na Tabela 1. A pesquisa dos autores concluiu que a utilização da filosofia OC levou a uma economia financeira considerável, pois, além de seus custos serem menores devido à modalidade de monitoramento e inspeção, ela minimizou as despesas de tempo de inatividade e manutenção, maximizando a utilização das aeronaves.

Ainda segundo a proposta de Bevictori e Alves (2019), com a implementação de um sistema de monitoramento, o ECTM permite que os dados sejam depositados e tratados em uma plataforma, a WebECTM. De efeito, tornam-se possíveis a verificação e o acompanhamento das condições físicas e funcionais dos componentes, como salienta Weber (1980), evitando-se o problema pontuado por Siladic e Rasuo (2009), de que, em manutenções onde o TBO é empregado, 35% da vida útil do equipamento não eram aproveitados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa ressaltou a importância da adoção da filosofia OC, especialmente em relação à disponibilidade da frota em função da eficiência desse tipo de manutenção. O objetivo consistiu em analisar os benefícios e as vantagens dessa abordagem, diferenciando-a da filosofia HT.

No contexto histórico, foi enfatizada a importância da atividade de manutenção desde a concepção das máquinas voadoras mais pesadas que o ar, reconhecendo-se sua essencialidade para a garantia da segurança e da continuidade da vida útil do equipamento. Apurou-se ainda que, ao longo do tempo, houve uma evolução nas práticas relacionadas a essa atividade, com uma crescente demanda por eficiência e confiança em seus processos, o que resultou na elaboração de diferentes conceitos e filosofias de manutenção e, naturalmente, na discussão sobre qual delas deve ser aplicada.

Tendo como certa a deterioração natural dos componentes, ressaltou-se a necessidade de inspeções frequentes e mais eficazes, levando em consideração também os custos associados. Nesse último aspecto, em específico, constatou-se a economia gerada pela filosofia OC, que inspeciona as condições e avalia se os sistemas estão aeronavegáveis sem a necessidade periódica de indisponibilizar a aeronave e sem afetar a credibilidade da operação. Ao se considerar, ainda, os principais fatores que causam a indisponibilidade das aeronaves, identificaram-se os defeitos e problemas em peças, componentes e sistemas como os mais recorrentes, os quais poderiam ser reduzidos por meio do monitoramento das condições.

Similarmente, a comparação entre as filosofias OC e HT conduzida por Bevictori e Alves (2019) enfatizou primordialmente a redução de custos da abordagem OC em relação à HT. Esta análise evidenciou que a exclusão da HSI do programa de manutenção resultou em economias consideráveis para a operação e em uma segurança maior devido aos dados coletados e controlados.

Com isso, esta pesquisa conclui que a incorporação da filosofia de manutenção OC ao programa de manutenção da frota pode conceder vantagens consideráveis em relação à disponibilidade das aeronaves, pois prolonga a vida útil do componente & identificado como apto para o voo, sem qualquer comprometimento à segurança do voo. Além do aprimoramento da integridade, com base nas informações extraídas do sistema, adia-se uma intervenção de manutenção mais invasiva, a qual sujeitaria o equipamento a riscos adicionais, tais como falhas humanas ou danos em componentes antes não afetados.

Por fim, sugere-se como pesquisa futura que seja realizada uma comparação entre as filosofias HT e OC em termos de custos e segurança em motores das aeronaves da família Sêneca, pois estes aviões são empregados em larga escala no segmento da aviação privada, segmento com o maior número de acidentes aéreos nos últimos 10 anos, tendo a manutenção aeronáutica como o sexto fator contribuinte para esses acidentes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Anacpédia**: Convenção de Aviação Civil Internacional. s. d. Disponível em: <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por-esp/tr1257.htm>. Acesso em: 24 mar. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Organização da Aviação Civil Internacional**. 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/internacional/organismos-internacionais/organizacao-da-aviacao-civil-internacional-oaci>. Acesso em: 25 mar. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Instrução Suplementar (IS) nº 91.409-001, Revisão B**: manutenção de aeronaves, tempo recomendado entre as revisões gerais. Brasília: ANAC, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **RBAC nº 43**: manutenção de aeronaves. Emenda nº 05. Brasília: ANAC, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **RBAC nº 135, Emenda nº 13**: Operações de transporte aéreo público com aviões com configuração máxima certificada de assentos para passageiros de até 19 assentos e capacidade máxima de carga paga de até 3.400 kg (7.500 lb), ou helicópteros. Brasília: ANAC, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **RBAC nº 121, Emenda nº 20**: Operações de transporte aéreo público com aviões com configuração máxima certificada de assentos para passageiros de mais de 19 assentos ou capacidade máxima de carga paga acima de 3.400 kg. Brasília: ANAC, 2024.

BEVICTORI, L.; ALVES, A. F. Análise comparativa das filosofias de manutenção Hard Time e On Condition. Interação, **Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 19, n. 1, p. 201 - 214, 04 mar. 2019. Disponível em: <https://periodicos.unis.edu.br/index.php/interacao/article/view/127/114>. Acesso em: 3 mar. 2024.

BOHREY, O. P.; CHATPALLIWAR, A. S. Application of reliability centred maintenance in improving aircraft availability with preventive maintenance intervention. **Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology**, Nagpur, v. 42, p. 115-129, 26 mar. 2024. Acesso em: 12 abr. 2024.

CENTRO DE INSTRUÇÃO DE AVIAÇÃO DO EXÉRCITO (CIAVEX). Programa de manutenção de aeronaves. **Revista Eletrônica Pegasus**, Brasília, Ed. 18, p. 13-16, jul./dez. 2012. Disponível: <https://ciavex.eb.mil.br/pegasus/pegasus18/sma.html>. Acesso em: 11 mar. 2024.

CIVIL AVIATION AUTHORITY (CAA). **CAP 718**: human factors in aircraft maintenance and inspection. London: CAA, 2002.

COMANDO DA AERONÁUTICA. **ICA nº 66-13**: manutenção de aeronaves. Brasília: COMAER, 2004.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). Painel SIPAER. 2024. Disponível em: <https://painelsipaer.cenipa.fab.mil.br/extensions/Sipaer/Sipaer.html>. Acesso em: 30 maio 2024.

CORRÊA, R. F.; DIAS, A. Modelagem matemática para otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 23, n. 2, p. 267-278, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-530X2001-15>. Acesso em: 14 abr. 2024.

DINIS, D. N. C. C. **Análise do Line Maintenance Manual numa perspectiva de melhoria contínua do programa de manutenção avião**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2009. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/432/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2024.

ENCICLOPÉDICA SIGNIFICADOS. **Significado de entropia**. s. d. Disponível em: <https://www.significados.com.br/entropia/>. Acesso em: 20 mar. 2024.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Annex 8**: Airworthiness of Aircraft. 13th edition. Montreal: ICAO, 2022.

KINNISON, H. **Aviation maintenance management**. United States: McGraw-Hill, 2004.

LEMOS, V. **História da aviação**. 2012. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/1aaab75e-b37f-4d26-acc1-8a54ca2ecd79>. Acesso em: 2 mar. 2024.

LIANG,Z.; CHAOVALITWONGSE, W. A. The aircraft maintenance routing problem. *In: Optimization and Logistics Challenges in the Enterprise*, p. 327-348, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/227152655>. Acesso em: 14 abr. 2024.

NAVAL AIR SYSTEMS COMMAND (NAVAIR). **Designing on-condition tasks for naval aircraft**. United States of America: NAVAIR, 1980.

PAPAGEORGIO, M. **Charles E. Taylor**: the unsung hero of kitty hawk finally gets his day. Disponível em:
https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/history/pioneers/Charles_E_Taylor.pdf. Acesso em: 2 mar. 2024.

RAMALHO, M. H. M. C. **Um contributo para a implementação de um gestor de conteúdos na atividade de manutenção aeronáutica–Mapeamento de processos e proposta de unificação**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Disponível em:
https://run.unl.pt/bitstream/10362/11336/1/Ramalho_2013.pdf. Acesso em: 3 mar. 2024.

RIBEIRO, R. P. F. **Controlo de programa de manutenção de aeronaves-variante estruturas e sistemas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2009. Disponível em:
<https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/625/1/1.%20Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

SCHRAMM, J. F. O domínio do ar: surgimento, impacto e evolução do poder aéreo nas duas grandes guerras mundiais. **Revista da UNIFA**, Rio de Janeiro, ano 2019, ed. 2, v. 32, p. 37-46, dez. 2019. Disponível em:
https://www2.fab.mil.br/unifa/images/revista/pdf/v32n2/4_Art_151_Domnio.pdf. Acesso em: 3 mar. 2024.

SILADIC, M. F.; RASUO, B. On-Condition maintenance for nonmodular jet engines: an experience. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v.13, nº3, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245353949_On-Condition_Maintenance_for_Nonmodular_Jet_Engines_An_Experience. Acesso em: 10 abr. 2024.

SUTARIA, R. D. **Measuring aircraft maintenance availability**. 2018. Disponível em: https://sassofia.com/wp-content/uploads/2018/11/Measuring_Aircraft_Maintenance_Availability_.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

TELECURSO 2000. **Manutenção mecânica**: apostila do curso técnico em Mecânica, 2014. Disponível em:
<https://fuvestibular.com.br/downloads/apostilas/Telecurso-2000/metal-mecanica/manutencao/1-introducao-a-manutencao.pdf?x16230>. Acesso em: 2 mar. 2024.

THILAKAN S.; PERIYARSELVAM U.; TAMILSELVAN T.; SHANMUGARAJA M. Analysis on costs for aircraft maintenance. **Advances in Aerospace Science and Applications**, ISSN 2277-3223, v. 3, n. 3, p. 177-182, 2013. Disponível em:

https://www.ripublication.com/aasa/aasav3n3spl_08.pdf. Acesso em: 3 mar. 2024.

WEBER, A. A Evolução da filosofia de manutenção de aeronaves. **A Defesa Nacional**, v. 67, n. 689, p. 79-83, 1980. Disponível em: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/ADN/article/view/7429/6407>. Acesso em: 10 mar. 2024.

