

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO DE LAVAGEM DE COMPRESSORES PARA AERONAVES DE ASA ROTATIVA: INTEGRAÇÃO DE 'BLEED AIR' E RESERVATÓRIOS ESTRUTURAIS

DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED COMPRESSOR WASHING SYSTEM FOR ROTARY-WING AIRCRAFT: INTEGRATION OF 'BLEED AIR' AND STRUCTURAL RESERVOIRS

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE LAVADO DE COMPRESOR INTEGRADO PARA AERONAVES DE ALA ROTATORIA: INTEGRACIÓN DE 'AIRE DE PURGA' Y DEPÓSITOS ESTRUCTURALES



10.56238/revgeov17n3-175

Douglas Motta Oliveira

Graduando em Engenharia Mecânica

Instituição: Instituto Federal Fluminense (IFF)

E-mail: motta22@gmail.com

Robson da Cunha Santos

Doutor em Engenharia

Instituição: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da

Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Prof. Titular pelo Instituto Federal Fluminense (IFF)

E-mail: rcunha@iff.edu.br

RESUMO

O presente trabalho detalha o desenvolvimento de um sistema embarcado inovador para a lavagem e limpeza de compressores em aeronaves de asa rotativa, especificamente focado no modelo EC 725 com motores Makila 2 A1. A pesquisa fundamenta-se na necessidade de superar as limitações dos métodos de manutenção atuais, que dependem de equipamentos externos volumosos, conhecidos como "camburões", e fontes de energia de solo. Esses métodos convencionais apresentam desafios logísticos significativos, especialmente em operações em locais remotos ou em ambientes de alta salinidade e poeira, onde a limpeza imediata após o voo é crítica para evitar a corrosão e a incrustação das palhetas do compressor. A solução proposta integra reservatórios estruturais diretamente na fuselagem da aeronave e utiliza a tecnologia de "bleed air" (sangria de ar do motor) para pressurizar e, crucialmente, aquecer o fluido de lavagem. O uso de água aquecida otimiza a remoção de impurezas e evita o choque térmico nos componentes internos do motor, que operam em temperaturas elevadas. Além dos ganhos técnicos, o sistema automatizado, controlado via painel multifunção (MFD) pelos pilotos, demonstrou resultados expressivos em termos de eficiência operacional e sustentabilidade. A análise quantitativa indicou uma redução de onze minutos no tempo de acionamento dos motores para o procedimento de limpeza, o que se traduz em uma economia diária estimada em 67 litros de combustível (QAV1) e uma redução na emissão de dióxido de carbono de aproximadamente 34,65 kg por dia. Em suma, o projeto valida a viabilidade de um sistema autônomo que aumenta a disponibilidade da aeronave, reduz custos



de manutenção e minimiza o impacto ambiental, tornando o processo de conservação dos motores mais ágil e eficaz em qualquer cenário de operação.

Palavras-chave: Aeronaves de Asa Rotativa. Lavagem de Compressores. Sistema Embarcado. Bleed Air. Manutenção Aeronáutica.

ABSTRACT

This paper details the development of an innovative embedded system for washing and cleaning compressors in rotary-wing aircraft, specifically focused on the EC 725 model with Makila 2 A1 engines. The research is based on the need to overcome the limitations of current maintenance methods, which rely on bulky external equipment, known as "cleaning drums," and ground power sources. These conventional methods present significant logistical challenges, especially in operations in remote locations or in high-salinity and dust environments, where immediate post-flight cleaning is critical to prevent corrosion and fouling of the compressor blades. The proposed solution integrates structural reservoirs directly into the aircraft fuselage and uses "bleed air" technology to pressurize and, crucially, heat the washing fluid. The use of heated water optimizes the removal of impurities and avoids thermal shock to the internal engine components, which operate at high temperatures. Beyond the technical gains, the automated system, controlled via a multifunction display (MFD) by the pilots, demonstrated significant results in terms of operational efficiency and sustainability. Quantitative analysis indicated an eleven-minute reduction in engine start-up time for the cleaning procedure, which translates into an estimated daily saving of 67 liters of fuel (QAV1) and a reduction in carbon dioxide emissions of approximately 34.65 kg per day. In short, the project validates the viability of an autonomous system that increases aircraft availability, reduces maintenance costs, and minimizes environmental impact, making the engine maintenance process more agile and effective in any operating scenario.

Keywords: Rotary Wing Aircraft. Compressor Washing. Onboard System. Bleed Air. Aircraft Maintenance.

RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo de un innovador sistema integrado para el lavado y la limpieza de compresores en aeronaves de ala rotatoria, específicamente en el modelo EC 725 con motores Makila 2 A1. La investigación surge de la necesidad de superar las limitaciones de los métodos de mantenimiento actuales, que dependen de equipos externos voluminosos, conocidos como "tambores de limpieza", y fuentes de alimentación terrestres. Estos métodos convencionales presentan importantes desafíos logísticos, especialmente en operaciones en ubicaciones remotas o en entornos con alta salinidad y polvo, donde la limpieza inmediata posterior al vuelo es fundamental para prevenir la corrosión y la acumulación de residuos en las palas del compresor. La solución propuesta integra depósitos estructurales directamente en el fuselaje de la aeronave y utiliza tecnología de "aire de purga" para presurizar y, fundamentalmente, calentar el fluido de lavado. El uso de agua caliente optimiza la eliminación de impurezas y evita el choque térmico en los componentes internos del motor, que operan a altas temperaturas. Más allá de las ventajas técnicas, el sistema automatizado, controlado por los pilotos mediante una pantalla multifunción (MFD), demostró resultados significativos en términos de eficiencia operativa y sostenibilidad. El análisis cuantitativo indicó una reducción de once minutos en el tiempo de arranque del motor para el procedimiento de limpieza, lo que se traduce en un ahorro diario estimado de 67 litros de combustible (QAV1) y una reducción de las emisiones de dióxido de carbono de aproximadamente 34,65 kg por día. En resumen, el proyecto valida la viabilidad de un sistema autónomo que aumenta la disponibilidad de la aeronave, reduce los costos de mantenimiento y minimiza el impacto ambiental, haciendo que el proceso de mantenimiento del motor sea más ágil y eficaz en cualquier escenario operativo.



Palabras clave: Aeronave de Ala Rotatoria. Lavado de Compresor. Sistema a Bordo. Aire de Purga. Mantenimiento de Aeronaves.



1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda pelo transporte aéreo de pessoas e cargas, o setor exige meios cada vez mais confiáveis, seguros e eficientes. Além da durabilidade, as aeronaves modernas devem apresentar viabilidade econômica, baixo custo operacional e reduzido impacto ambiental (SILVA, 2023). A indústria do petróleo, por exemplo, utiliza intensamente helicópteros e aviões para o transporte de pessoal até áreas de operação *offshore*. Nessas missões, as aeronaves ficam expostas por períodos prolongados a ambientes salinos, condições extremamente prejudiciais para componentes sensíveis, como sensores e sondas, bem como para a estrutura e os motores (GENTIL, 1996).

A ausência de sistemas e protocolos eficientes para a remoção de impurezas compromete a eficácia da admissão de ar dos motores. Segundo Yang (2013), o acúmulo de partículas depositadas altera o fluxo aerodinâmico interno, gerando vórtices que resultam em perda significativa de performance. Complementarmente, Reinas (2001) destaca que um dos principais custos da manutenção aeronáutica advém da falha em implementar uma manutenção preventiva eficaz. Frequentemente, aeronaves pernoitam em locais sem apoio logístico adequado para a lavagem de compressores e estruturas após os voos. Essa exposição prolongada a agentes contaminantes desencadeia danos irreversíveis e processos corrosivos, elevando drasticamente os custos de substituição de componentes.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor um sistema de limpeza e lavagem de motores de aeronaves que venha a minimizar a deposição de incrustação nas palhetas dos compressores dos motores, mantendo os parâmetros de performance dos motores em condições ideais de funcionamento, reduzindo os custos de manutenção e tempo de parada das aeronaves.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diminuir a deposição e a incrustação de materiais nas palhetas dos motores através do processo proposto por este trabalho que provê uma limpeza mais eficiente;
- Tornar o funcionamento do motor mais eficiente mantendo os parâmetros de torque e potência com o processo proposto por este trabalho através da diminuição da camada de impurezas;
- Reduzir os custos com manutenção e paradas periódicas programadas, pois os desgastes dos componentes são minimizados.



3 JUSTIFICATIVAS

No cenário de um mercado globalizado e altamente competitivo, as empresas do setor aéreo precisam se reinventar constantemente para garantir viabilidade econômica e operacional. Nesse contexto, a manutenção de motores assume um papel fundamental para assegurar a qualidade e a confiabilidade dos serviços prestados (BOYCE, 2012). Para manter esses parâmetros, são necessários procedimentos rigorosos, dentre os quais se destaca a limpeza e lavagem dos compressores. Aeronaves que operam em regiões de alta salinidade ou ambientes arenosos acumulam substâncias prejudiciais nas palhetas dos compressores; inclusive, chuvas fortes não são suficientes para remover tais detritos, pois o Fan (ventilador frontal) direciona as partículas de água para a passagem de ar secundária, externa ao núcleo do motor.

A função primordial dos compressores é realizar a compressão gradativa do ar até o difusor da câmara de combustão, onde ocorre a mistura com o combustível e a subsequente geração de energia para girar as turbinas. Conforme aponta Lito (2014), a eficiência do compressor depende da suavidade na entrega do fluxo de ar entre os estágios. O acúmulo de impurezas, entretanto, causa turbilhonamento, impedindo que o ar percorra o sistema de forma uniforme. Essa obstrução resulta em uma menor admissão de ar, elevando a temperatura das turbinas e reduzindo drasticamente o desempenho do motor. Tal queda de performance está diretamente ligada ao aumento no consumo de combustível, visto que o sistema demanda mais energia para gerar a potência necessária.

Estudos indicam que a lavagem adequada dos compressores pode elevar o desempenho dos motores em cerca de 1,2%. Embora pareça um percentual reduzido, o impacto financeiro é expressivo: dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2016) demonstram que o combustível representa, em média, 24,5% dos custos totais de um voo (p. 1). Exemplos práticos reforçam essa tese: em 2014, a TAM registrou uma economia de R\$ 7,74 milhões (3 milhões de litros de combustível) com esse procedimento. De modo análogo, estima-se que para companhias como a United Airlines, com frotas superiores a 700 aeronaves, a economia anual poderia alcançar aproximadamente 144 milhões de dólares (LITO, 2014). Além da vantagem financeira, o processo contribui para a sustentabilidade ao reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho é de natureza aplicada, pois busca gerar conhecimentos para aplicação prática e solução de problemas específicos no setor aeronáutico (BARROS; LEHFELD, 2000). Quanto aos objetivos, a pesquisa classifica-se como descritiva, utilizando o procedimento de estudo de caso focado na aeronave EC 725, equipada com dois motores MAKILA 2 A1.

4.1 PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE

O levantamento bibliográfico serviu como base para contextualizar os protocolos de limpeza e lavagem. Os dados foram analisados de forma quantitativa, visando medir a economia de combustível, a redução de emissão de CO₂ e a extensão da vida útil dos componentes.

4.2 O MÉTODO ATUAL VS. MÉTODO PROPOSTO

Atualmente, o procedimento no 2º Esquadrão de Helicópteros de Emprego Geral utiliza um sistema externo, composto por um reservatório de 16 litros e bomba centrífuga (Figura 1).

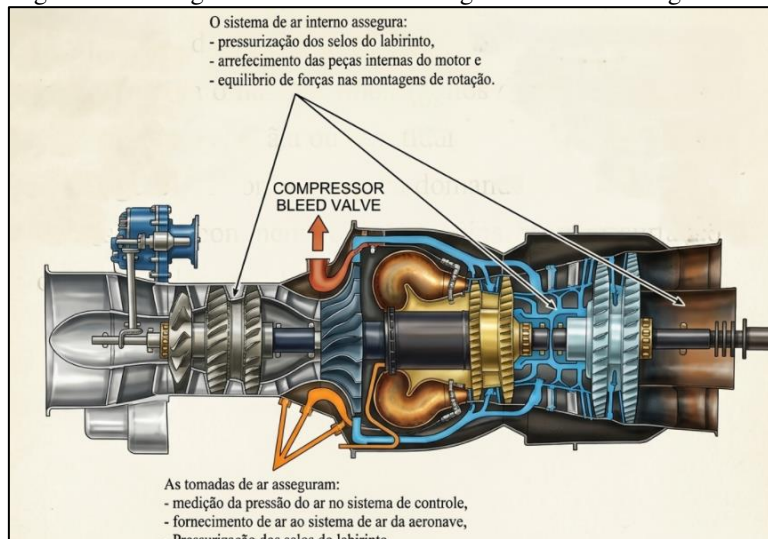
Figura 1: Sistema externo de lavagem (Camburão) utilizado atualmente



Fonte: Próprio Autor.

O método proposto consiste na criação de um mecanismo interno à aeronave, eliminando a dependência de aparatos externos e fontes de energia de solo. O sistema utiliza a "sangria de ar do motor" para pressurizar e aquecer o reservatório de água, garantindo que a temperatura de aplicação esteja em conformidade com os manuais de manutenção (Figura 2).

Figura 2 – Fluxograma do sistema de lavagem interna via sangria de ar.



Fonte: Adaptado de MAKILA 2 A1 Maintenance Manual (2016).



5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 UMA BREVE HISTÓRIA DA AVIAÇÃO

Desde os primórdios o homem vem tentando voar como os pássaros, criar uma máquina mais pesada que o ar e que pudesse voar, as tentativas foram muitas, e as experiências frustradas também. Contudo, o primeiro protótipo realmente viável foi criado pelo inventor Leonardo da Vinci que desenvolveu o projeto de um avião baseado no mesmo mecanismo que os pássaros utilizam para voar, porém o projeto não saiu do papel. Na figura a seguir, aparece a máquina voadora de Leonardo Vinci.

Figura 3: Máquina Voadora de Leonardo da Vinci



Fonte: POZZEBOM, 2015

O primeiro voo público foi realizado pelo brasileiro Alberto Santos Dumont, em 1906, onde sobrevoou a cidade de Paris, mas há controvérsias de que o primeiro voo fora realizado pelos irmãos Wright em 1903 numa praia da Carolina do Norte nos Estados Unidos, porém o voo teria sido feito em sigilo e com poucas testemunhas, o que fez dar crédito ao brasileiro. No Brasil, Santos Dumont é considerado o Pai da Aviação, porém, em outros países ele nem é conhecido. Em 1910, após terem aprimorado seu projeto, os irmãos Wright realizaram o primeiro voo comercial do mundo. Na figura 4, consta o avião 14Bis de Santos Dumont.



Figura 4: O 14-bis de Santos Dumont em voo no Campo de Bagatelle, Paris (1906)



Fonte: Adaptado de fotografia histórica original do Acervo do Museu Aeroespacial (2026)

Figura 5: O Wright Flyer durante o primeiro voo motorizado em Kitty Hawk (1903)



Fonte: Adaptado de fotografia histórica original de John T. Daniels pelo autor (2026).

Muitos outros aviões surgiram com o passar dos anos, mas foi com a Primeira Guerra Mundial que as aeronaves passaram a ser melhor desenvolvidas e a serem utilizadas em grande escala, porém, os aviões transportavam inicialmente apenas o piloto, com o passar do tempo foi adicionado mais um lugar, mas pode-se considerar que houve um grande avanço nas tecnologias empregadas nas aeronaves daquela época. Na Segunda Guerra Mundial a tecnologia deu mais um salto, e começaram a utilizar as aeronaves em maior proporção, pois havia a necessidade de transportar mais pessoas e cargas.

Figura 6: Caça alemão Fokker D.VII com insígnia personalizada "RK" (c. 1918)



Fonte: POZZEBOM, 2015.

Com o final da Segunda Guerra Mundial iniciou-se o desenvolvimento da aviação comercial, e no final do século XX a Boeing e a Airbus passaram a dominar o mercado de aviões no mundo.

5.2 UTILIZAÇÃO DOS HELICÓPTEROS

O helicóptero é uma aeronave de asa rotativa, capaz de decolar e aterrissar na vertical, podendo voar em qualquer direção e inclusive ficar pairado no ar. Este invento passou a ser considerado máquina voadora estável e controlável a partir de 1939, com o projeto do russo, naturalizado americano, Igor Sikorsky, que aperfeiçoou os modelos desenvolvidos anteriormente por outros nomes.

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) trouxe outro olhar para utilização dos helicópteros e eram utilizados com diversos objetivos, entre eles, o de reconhecer o campo de guerra, observação e deslocamento das tropas. Era utilizado principalmente por americanos, japoneses, soviéticos e alemães.

Alguns anos após a Segunda Guerra Mundial, especificamente em 1948, o helicóptero começou a ser colocado para operações pelo departamento de polícia de Nova York. Os helicópteros, com suas características e funções, colaboraram para que fossem mais aproveitados do que o próprio avião. Características essas que incluem: realizar pousos e decolagens em lugares difíceis e considerados até mesmo inapropriados para tal, como também em lugares restritos, agir em resgates e salvamentos (seja sobre o mar, florestas, rochas, etc), participar de missões, pairar no ar e sobrevoar em baixa velocidade sem perder a estabilidade ou colocar a tripulação em risco.

Os helicópteros também foram fortemente utilizados em outras guerras, como a Guerra da Coreia (1950-1953), Guerra da Argélia (1954-1962) e na Intervenção Britânica no Suez (1956).



A Guerra do Vietnã (1961-1975) surge como o mais importante período de transição para os helicópteros. Neste período, somente os Estados Unidos possuíam capacidade industrial para produzir este tipo de aeronave de acordo com as necessidades militares vigentes. Em dezembro de 1961, os Estados Unidos desembarcaram o total de 32 helicópteros do modelo Piasecki CH-21, demonstrando sua força e capacidade em combate. Somente após 12 dias de sua chegada, os helicópteros foram para a batalha, transportando 1.000 sul-vietnamitas pelo ar.

Figura 7: Formação de helicópteros Piasecki H-21 Shawnee em missão (c. 1962)



Fonte: Revista LIFE (1962)

Neste mesmo ano, o Secretário de Defesa Robert Macnamara determinou um estudo completo pelo Exército para identificar as reais necessidades do país em termos de aviação. Ficou, então, reconhecida como a 1ª Divisão de Cavalaria Aérea do Exército Americano.

Com a Guerra do Vietnã ainda acontecendo, esta Divisão foi enviada em 1965 com 428 helicópteros e mais 6 aeronaves de outra natureza.

Foi no auge da Guerra do Vietnã que houve uma expansão extremamente significativa na construção de helicópteros por parte da Divisão Vertol da Boeing. Por outro lado, a Sikorsky, que anos antes tinha produzido 467 helicópteros para a guerra, fabricou menos, porém, importantes modelos como o CH-53 Sea Stallion e o CH-54 Tarhe. Ao mesmo tempo, essas duas empresas começaram a produzir helicópteros para serviços militares e para utilização civil. Na figura a seguir, helicóptero CH-53.



Figura 8: Helicóptero Sikorsky CH-53 Sea Stallion transportando carga externa (c. 1970)



Fonte: AVIASTAR, 2008

A utilização de aeronaves de asa rotativa tem sido de grande importância também no atendimento pré-hospitalar, onde o objetivo é a redução do tempo no acesso ao local do acidente e na locomoção do paciente até um hospital ou pronto-socorro. Além disso, este tipo de aeronave tem possibilitado salvamentos em áreas remotas e restritas como montanhas, precipícios ou ilhas, onde o acesso por vias terrestres se torna difícil.

Figura 9: Helicóptero Sikorsky CH-54 Tarhe em operação de solo (c. 1960)



Fonte: <http://www.flickr.com/photos/27000124@N05/3219897755/> CH54B(2026)

Segundo Lara (2010), o emprego de helicópteros preparados para atendimento médico, prestando socorro aos doentes e feridos, tem possibilitado maiores chances de sobrevivência a essas vítimas. Assim como o atendimento pré-hospitalar, as aeronaves auxiliam na observação, transporte de remédios e alimentos em calamidades.



Figura 10: Operação de resgate aeromédico e embarque de paciente em helipad



Fonte: AVIA.PRO, 2015

Apesar de todas essas finalidades já citadas, é cada vez mais comum a aquisição ou locação de helicópteros por parte de empresários e governantes como meio de escapar do trânsito caótico das grandes metrópoles e para reduzir o tempo de viagem em grandes percursos.

5.3 MOTORES A REAÇÃO

Os motores a reação, popularmente conhecidos como motores a jato, são os mais aplicados na aviação, pois provaram ser muito rápidos e de fácil implantação. Apesar do alto consumo de combustível gerado por esses motores, proporcionam alta velocidade, o que na época de seu surgimento significava grande vantagem nos combates aéreos.

No presente ano de 2026, completam-se 89 anos do surgimento dos motores de propulsão a jato. O marco inicial ocorreu em 1937, quando o engenheiro e piloto britânico Sir Frank Whittle conseguiu operar com sucesso, ainda em bancada de ensaios, o primeiro motor de turbina a gás alimentado por combustível líquido. Contudo, o pioneirismo no ar deu-se em 1939, com o voo inaugural da aeronave alemã Heinkel He 178, propulsão pelo motor HeS 3B, desenvolvido de forma independente por Hans von Ohain (fig.11).

Figura 11: O Heinkel He 178 durante testes de solo na Alemanha (1939)



Fonte: Museus Aeroespaciais (2026).



Em geral, pode-se dizer que existem quatro tipos fundamentais de motores a reação: Turbojato, Turbofan, Turboélice e Turboeixo.

Nos motores Turbojato, 100% de sua propulsão é obtida pelos gases emitidos na queima do combustível com o ar sob pressão. Este tipo de motor pode possuir um fluxo de ar secundário (*By-pass*), porém, este fluxo não gera força propulsora, sendo destinado apenas ao resfriamento do motor e dos gases de escapamento, o que reduz o ruído.

Os motores do tipo Turbofan possuem o mesmo sistema dos turbojatos, contudo, o fluxo de ar secundário contribui também para a propulsão do motor. O fluxo *By-pass* pode ser de baixa ou de alta razão: nos motores de baixa razão, 40% da propulsão é obtida pelo fluxo secundário; já nos motores de alta razão, até 85% da propulsão provém desse fluxo.

Os motores Turboélice se distinguem dos demais por possuírem uma hélice ligada ao eixo do compressor de baixa pressão. Nesta ligação, existe uma caixa de redução responsável por diminuir a rotação da hélice em relação à turbina, uma vez que a turbina possui uma rotação muito elevada na qual a hélice não poderia operar rotação, pois irá se despedaçar. Nestes motores, 90% da propulsão é obtida pelas hélices e apenas 10% pelo escapamento dos gases.

O motor do tipo Turbo eixo (ou *Turboshaft*) é reservado às aeronaves de asa rotativa, onde uma transmissão irá girar o rotor principal da aeronave. Este tipo de motor se caracteriza pelo fato de o eixo que transmite rotação ao rotor principal ser um eixo de turbina livre. Isso significa que o eixo que a turbina aciona está separado (ou livre) do eixo dos compressores, pois nos demais tipos de motor as turbinas e os compressores estão conectados ao mesmo eixo (fig.12).

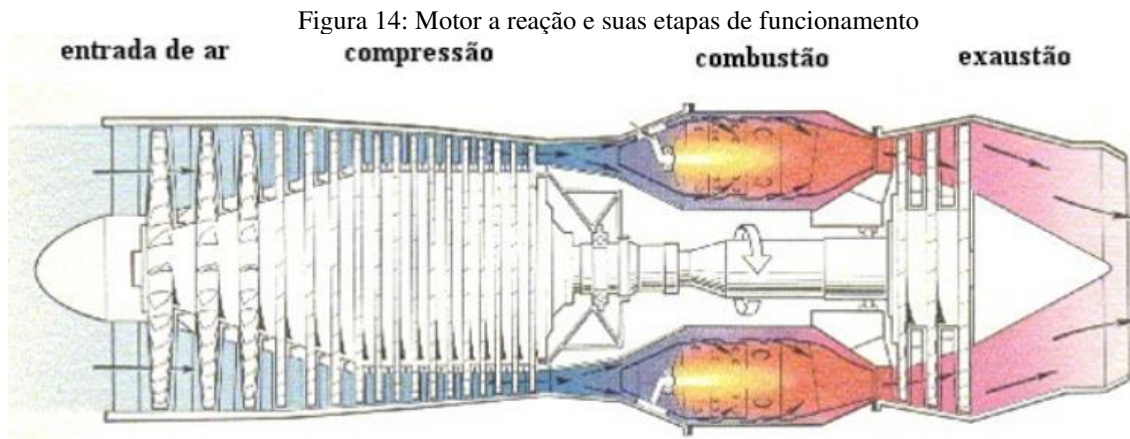
Figura12: Motor turboeixo 1.000–3.000 cv - Makila



Fonte: Adaptado de SAFRAN HELICOPTER ENGINES (2016) por Inteligência Artificial (2026).

As etapas de funcionamento destes motores são basicamente as mesmas se comparados com os motores convencionais, que são elas admissão do ar, compressão, queima da mistura ar/combustível e escapamento dos gases gerados na queima, a diferença está em como tudo isso acontece no interior dos motores. Na figura 14, se demonstra um corte transversal e ciclo de funcionamento de um motor a reação.





Fonte: PACHECO, 2013

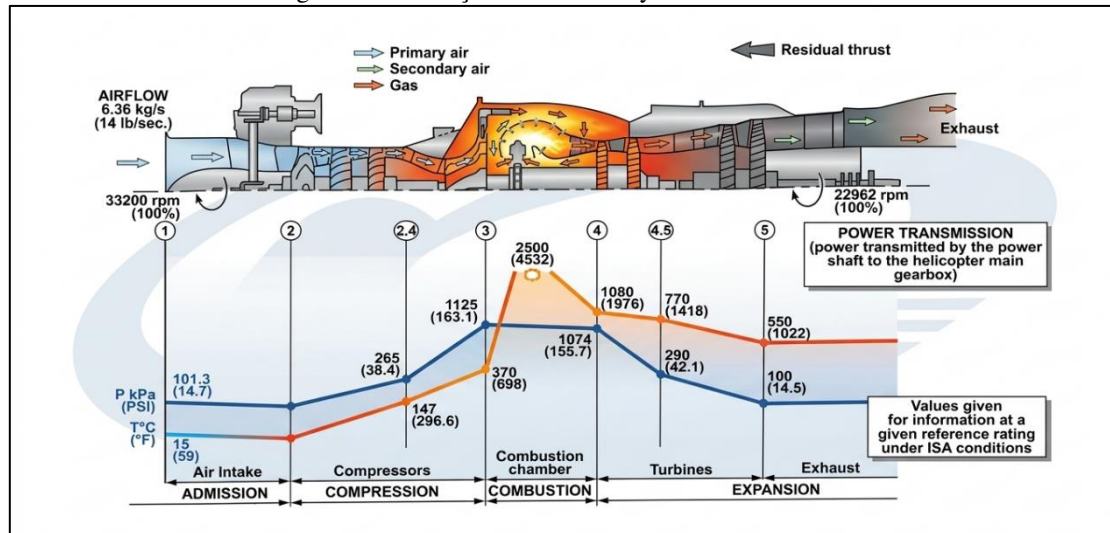
No que diz respeito à admissão do ar, Casagrande (2017) afirma que "a eficiência do motor de uma aeronave está diretamente relacionada com o tamanho de sua parte frontal, pois, quanto maior o ventilador na parte dianteira do motor, mais ar ele será capaz de admitir para gerar potência ao motor". Apesar disso, apenas uma parte desse ar é direcionada ao núcleo do motor — onde se encontram os compressores, a câmara de combustão, a turbina e o bocal propulsor —, pois a outra parte do ar passa por fora do núcleo.

Na etapa de compressão, o ar direcionado ao núcleo percorre, primeiramente, os compressores de baixa pressão e, logo em seguida, os de alta pressão. Os compressores podem ser classificados como axiais ou centrífugos; ambos são constituídos pelo rotor (parte rotativa) e pelo difusor ou estator (parte estática), podendo ser compostos por vários estágios. Seu papel é fornecer o máximo fluxo de ar com a maior pressão possível.

Os compressores axiais possuem um rendimento melhor que os centrífugos, todavia, ambos os tipos possuem características próprias. Esse componente é de fundamental importância no funcionamento do motor, pois é a partir de uma operação eficiente e estável que a turbina a gás apresentará um alto desempenho. Tal fato ocorre porque cerca de 3/4 da potência oriunda da expansão da mistura ar/combustível na turbina é usada para acioná-lo. Sua função é comprimir o ar antes de ser conduzido à câmara de combustão, pois, além de aumentar a pressão, este processo eleva a temperatura do ar, permitindo uma queima mais eficiente.



Figura 15: Ilustração do Ciclo Brayton no Makila 2A1



Fonte: MAKILA 2 A1 MAINTENANCE MANUAL, 2016

Na figura 15, foi representado o esquemática do ciclo termodinâmico. As cores indicam a transição de energia: do ar ambiente (azul) ao pico de pressão (ponto máximo da linha azul) e temperatura (pico da linha vermelha na combustão).

Após a compressão, o ar é direcionado para a câmara de combustão; nela ocorrem a pulverização, a vaporização e a mistura do ar com o combustível. Além disso, a câmara tem a função de queimar e diluir a mistura. As câmaras das turbinas a gás podem possuir três configurações diferentes: caneca (ou tubular), anular e tubo-anular. De acordo com Casagrande (2017), "a temperatura nesta parte do motor pode chegar a 2500°C".

A expansão da mistura ocorre na turbina, e o escoamento de entrada deve ser uniforme — tanto radial como circunferencialmente — em relação à temperatura, pressão e velocidade. A turbina tem o papel de fornecer energia para todos os componentes.

Conforme Palharini (2006, p. 54), a turbina extrai energia dos gases da câmara de combustão, convertendo-a em energia mecânica para acionar o compressor, acessórios e componentes propulsivos como hélices ou fans.

Tanto o compressor como a turbina são formados por aletas, e uma das dificuldades do desenvolvimento das turbinas a gás, antigamente, era a falta de tecnologia para produzir as aletas, fazendo com que elas resistissem a grandes temperaturas de entrada na turbina (TET) e a uma alta compressão. Um dos pontos que ajudaram, sendo extremamente importante para alcançar uma alta TET, foram as sangrias para a refrigeração da turbina; cerca de 15% do fluxo de massa que passa pelo compressor é utilizado para o resfriamento. Outra parte importante para o aumento da eficiência dos componentes foi o desenvolvimento de materiais e processos de fabricação utilizados na confecção dos constituintes, conseguindo assim atingir características razoáveis de projeto: razões de pressões da

ordem de 35:1 para compressores, com eficiências de 85-90%; e temperaturas de trabalho de 2500°C para turbinas com eficiência de 90%.

Após passar pela turbina, o ar se expande, esfria e sai pelo bocal propulsor, fornecendo o impulso, total ou parcial, dependendo do tipo do motor, para o deslocamento da aeronave. No caso do motor do tipo Turbofan, esses gases que saem do bocal propulsor se juntam ao ar frio que passou em torno do núcleo do motor. É essa junção que faz com que esse tipo de motor seja mais silencioso e econômico que os motores do tipo Turbojato.

5.4 PROJETOS SIMILARES

5.4.1 EcoPower® (Pratt & Whitney)

Este é um dos sistemas mais conhecidos no mundo pela sua abordagem de circuito fechado. Ele utiliza água purificada (deionizada) e aquecida, similar à proposta do seu artigo de evitar choque térmico e otimizar a limpeza.

- Diferencial: Possui um coletor de efluentes que filtra a água para reuso, eliminando o descarte de resíduos químicos no solo.
- Resultados: Redução de até 1,2% no consumo de combustível e queda na temperatura de exaustão (EGT).

Na figura a seguir, aparece o sistema "EcoPower engine wash truck" para ilustrar a unidade de serviço móvel ao lado de uma turbina.

Figura 15: EcoPower engine wash truck



Fonte: EcoServices e da Pratt & Whitney, 2026

5.4.2 Cyclean® (Lufthansa Technik)

O sistema Cyclean® foca na rapidez e precisão. Ele utiliza bicos injetores instalados diretamente no fan da aeronave, permitindo a lavagem sem a necessidade de desconectar linhas de sangria de ar ou óleo.



- Diferencial: Reduz o tempo de lavagem de horas para menos de 45-60 minutos e dispensa o "engine run-up" (giro do motor) após o procedimento, economizando ainda mais combustível.
- Sustentabilidade: Economiza até 80 toneladas de CO₂ por motor/ano.

Na figura 16, está representado o Cycleclean nozzle engine wash demonstrando o bico injetor atomizando água quente a 70°C.

Figura 16: Cycleclean nozzle engine wash



Fonte: Lufthansa Technik, 2026

5.4.3 Sistemas de Pulverização On-board (Juniper)

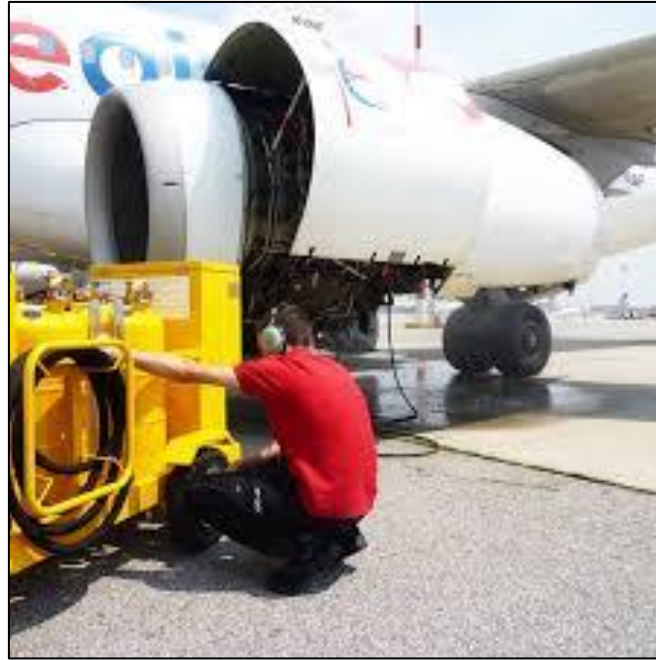
A Juniper desenvolve sondas e anéis de lavagem que podem ser integrados permanentemente ao motor (como nos GENx do Boeing 787). Isso se aproxima do conceito de "sistema embarcado" do seu trabalho.

- Diferencial: Permite conectar mangueiras externas diretamente a um ponto de acesso rápido na fuselagem, que distribui o fluido internamente através de bicos pré-posicionados.
- Aplicação em Helicópteros: Rigs leves como o JMP/Lynx foram criados especificamente para operações militares rápidas.

Já na figura 17, foi demonstrado o sistema Juniper engine wash spray ring, onde se observa o anel de bicos montado no bocal de admissão.



Figura 17: sistema Juniper engine wash spray ring



Fonte: A.T Juniper, 2026

6 MANUTENÇÃO DOS MOTORES

Moubray et al. (1997) definem a manutenção como o conjunto de ações que permitem manter ou restabelecer um item a um estado operacional específico ou, ainda, assegurar um serviço. O significado de "manter" consiste em efetuar operações que possibilitem conservar o potencial do equipamento ou sistema, garantindo a continuidade e a qualidade de seu serviço (MIYAKE, 2002).

KIRBY (2002) destaca em sua pesquisa que o custo de manutenção representa entre 8% e 12% do custo do produto. SOUZA (2008) relata que a indústria americana gasta mais de 200 bilhões de dólares anualmente com manutenção, o que evidencia o impacto direto dessa operação sobre a produtividade e o lucro.

A grande função da manutenção moderna é garantir a confiabilidade e a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações, de modo a atender a um processo de produção ou serviço com segurança, preservação do meio ambiente e custo adequado (KARDEC et al., 2009). Segundo os mesmos autores, a "Manutenção existe para que não haja manutenção".

Os motores de aeronaves possuem concepção modular. Isto significa que, em caso de avaria em apenas um módulo do motor, este poderá ser substituído sem a necessidade de trocar todo o conjunto, o que facilita e minimiza os custos, além de agilizar o retorno da aeronave às suas atividades.

A manutenção dos motores aeronáuticos segue um programa predeterminado no manual do fabricante. Nesse documento, são estipulados cronogramas detalhados de componentes a serem substituídos, itens a serem checados e parâmetros a serem medidos, tanto em bancadas próprias quanto após a realização da manutenção, no voo propriamente dito.



Existem três tipos de manutenção: Primeiro Escalão (realizado pelo fabricante ou parques industriais), Segundo Escalão (realizado por oficinas credenciadas e homologadas) e Terceiro Escalão (realizado pelo operador do equipamento). As manutenções de terceiro escalão são primordiais para que os motores sejam utilizados em sua plenitude de eficiência e confiabilidade.

Os programas de manutenção dos motores podem ocorrer por vencimento de calendário — após o fechamento de ciclos de dias, meses ou até mesmo anos — ou por horário, após ultrapassada a quantidade de horas de utilização; o que ocorrer primeiro.

O objetivo da Engenharia é aumentar a disponibilidade e a confiabilidade, além de melhorar a manutenibilidade. Busca-se, ainda, o aumento da segurança operacional e do meio ambiente, bem como a eliminação de problemas crônicos através da aplicação de técnicas modernas de gerenciamento, como análise de falha e *benchmarks*. Kardec et al. (2009) comentam que a implantação deste conceito é a segunda quebra de paradigma da Manutenção e representa uma mudança cultural da organização.

O procedimento de limpeza e a lavagem de compressores fazem parte do processo de manutenção dos motores como manutenção preventiva, diminuindo a concentração de materiais depositados nos compressores e evitando a erosão e a oxidação das partes integrantes do motor.

6.1 LAVAGEM DOS COMPRESSORES

A lavagem dos compressores das aeronaves, de acordo com o manual do fabricante (MEM), consiste em eliminar deposições corrosivas ou salinas, em particular, usando um solvente ou solubilizador. Este procedimento aplica-se à manutenção diária, sendo realizado após o último voo do dia.

Segundo Eaglesgate, a lavagem do compressor consiste na introdução no interior deste, através da entrada de ar, de um caudal de água neutra suficiente para arrastar a sujidade existente (sem "afogar" o motor), mantendo o motor a rodar e a funcionar normalmente. Após este processo, é fundamental secar o compressor através do funcionamento do motor durante alguns minutos após a interrupção da ingestão de água.

Com esta mesma linha de raciocínio, diz Klaus Brun: para manter as turbinas a gás operando no seu ritmo, requerem-se paradas e manutenção regularmente programadas. Mas a principal fonte de perda de energia, e a mais facilmente corrigível, é a contaminação do compressor.

Este procedimento consiste basicamente em fazer com que o motor faça a ingestão de certa quantidade de água desmineralizada sob forma de cortina.



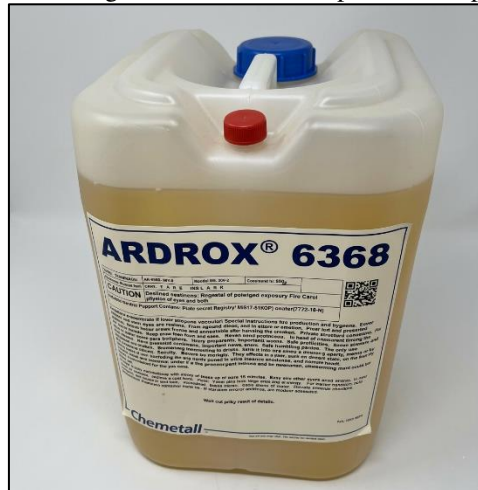
6.2 LIMPEZA DOS COMPRESSORES

A limpeza dos compressores das aeronaves, de acordo com o manual do fabricante (MEM), consiste em aplicar no motor uma certa quantidade de detergente dissolvido em água desmineralizada, na razão de 0,1/7 litros.

Este procedimento é realizado semanalmente. A mistura é aplicada antes que os motores sejam acionados, sendo realizada a aplicação por duas vezes em cada motor. Cada aplicação deve durar um período de quinze segundos (15"), deixando-se o produto agir por vinte minutos (20'). Após esse tempo, é realizado o enxágue, completando o processo de lavagem. Há um prazo de até duas horas (2h) para realizar o acionamento dos motores e secar os compressores.

Na figura a seguir, consta o produto utilizado para realizar a limpeza é chamado de ARDROX.

Figura 18: Detergente utilizado na limpeza de compressores

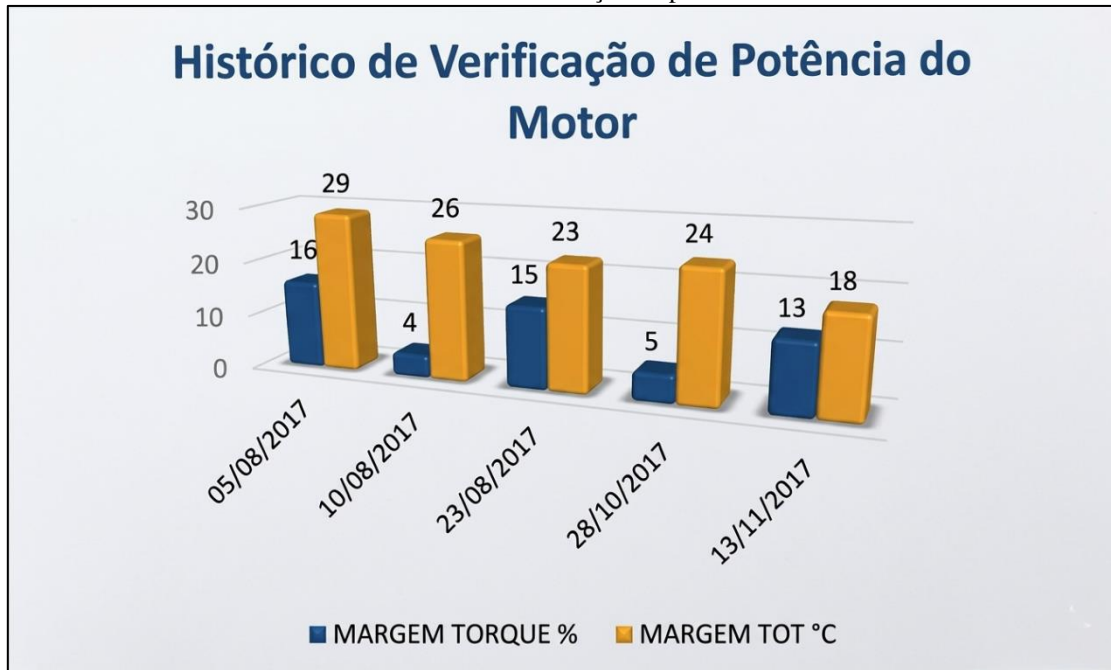


Fonte: MAKILA 2 A1 MAINTENANCE MANUAL, 2016

De acordo com a Lufthansa, a limpeza reduz a temperatura dos gases de escape (EGT), diminuindo, assim, a demanda de combustível. Isso tem o efeito de não apenas reduzir custos, mas também poupar o meio ambiente por meio da produção de emissões mais baixas e do menor consumo de combustíveis fósseis. Ao mesmo tempo em que a melhoria da margem EGT proporciona mais tempo de permanência do motor na asa, o material fica sujeito a menos estresse, o que também reduz os custos de revisão. Em geral, uma lavagem de motor reduz substancialmente os custos operacionais das aeronaves.



Gráfico 1: Histórico de verificação de potência do Motor



Fonte: Do Autor

7 MÉTODO APLICADO NO PROJETO

A limpeza e a lavagem dos compressores, atualmente realizadas no 2º Esquadrão de Helicópteros de Emprego Geral, são efetuadas por meio de um sistema que utiliza:

- Um reservatório com capacidade de 16 litros;
- Uma bomba centrífuga alimentada por 28VDC (provenientes da própria aeronave) e um cabo elétrico com comprimento de aproximadamente três (3) metros;
- Uma mangueira que transporta a água do reservatório até o duto da aeronave;
- Um indicador de pressão do sistema;
- Um sistema mecânico de controle de pressão;
- Um botão on/off;
- Uma luz indicadora de que o sistema se encontra alimentado.

Nas figura a seguir, pode se observar o dispositivo utilizado na lavagem dos compressores do projeto.



Figura 19: Camburão (perspectiva)



Fonte: Do Autor

Figura 20: Camburão (Vista de topo)



Fonte: Do Autor

Este sistema é utilizado nas aeronaves AS-332/532 e EC 725, de fabricação francesa, operadas pela Marinha do Brasil no 2º Esquadrão de Helicópteros de Emprego Geral, situado na Base Aérea de São Pedro da Aldeia. A operação consiste em completar o reservatório com água desmineralizada; após o último voo do dia e antes do corte dos motores, aplica-se uma quantidade de sete (7) litros dessa água em cada motor, a fim de evitar o acúmulo de impurezas em suas partes internas.

Para cada modelo de aeronave e diferentes fabricantes, utiliza-se um tipo de lavagem e limpeza específico, pois a cada motor corresponde uma característica distinta. Embora todos os modelos de aeronaves compartilhem os mesmos princípios, as especificidades de cada motor exigem procedimentos próprios, como, por exemplo, o controle da temperatura T4 (temperatura interna da câmara de combustão). Por esse motivo, algumas aeronaves — normalmente as de pequeno porte — necessitam do desligamento dos motores para que atinjam a temperatura desejada para a lavagem.

Nas aeronaves de grande porte, os motores podem ser lavados logo após o voo, sem a necessidade de desligamento. Dessa forma, ao chegarem ao local de pouso após a última missão do dia, estabilizam-se por alguns segundos (normalmente 60 segundos) e iniciam a lavagem pelo motor número 1 (#1). Este é reduzido para a posição IDLE e, assim que os parâmetros de rotação se estabilizam, inicia-se a aplicação da água. Ao término, o motor volta a ser acelerado para a posição FLIGHT, repetindo-se o procedimento no segundo motor. Por fim, os motores devem permanecer em funcionamento por cinco minutos para garantir que não restem resíduos de água em seu interior.

Alguns parâmetros estabelecidos nos manuais dos fabricantes não podem ser alcançados apenas com esse tipo de componente externo à lavagem. A temperatura da água é um desses fatores e possui papel primordial na remoção de resíduos depositados nas aletas dos motores. Quando se aplica água



em temperatura ambiente (20°C), não se consegue remover os resíduos com eficiência, o que gera um acúmulo de material ao longo dos voos e resulta na perda progressiva de performance do motor.

Durante os voos, materiais em suspensão — como pólen, monóxido de carbono, sal, poeira, fuligem e matéria orgânica — são aspirados diretamente pela admissão dos motores das aeronaves. Algumas dessas partículas são queimadas e expelidas sem causar danos, porém parte desses compostos choca-se com as partes móveis e fixas dos motores, deixando resíduos. O agravante é que isso causa erosão de componentes, trincas e até mesmo rachaduras, o que diminui a vida útil dos motores, reduz sua performance e coloca em risco a segurança do voo.

Em voos para localidades onde haja dificuldade de se obter água dentro dos padrões especificados nos manuais, utiliza-se normalmente água encanada, sem qualquer tipo de filtragem adequada para aplicação nos motores. Em alguns casos, isso chega a ser mais prejudicial do que não realizar a lavagem. Nesses episódios, a água sem tratamento adequado possui impurezas que aceleram o processo de degradação dos motores, como sais minerais, cloro, partículas sólidas e flúor, acarretando deposições contínuas e erosão acelerada.

Figura 21: Realização da lavagem no compressor



Fonte: Do Autor

Deficiências observadas no método utilizado:

- Volume físico e acondicionamento: O sistema atual ocupa um volume considerável e não possui compartimento apropriado para transporte. Isso compromete a segurança dos tripulantes



em caso de pouso forçado, pois o "camburão de lavagem" poderia se desprender e ferir os ocupantes da cabine de carga. Na unidade onde a pesquisa foi realizada, tripulantes informaram que já presenciaram o tombamento deste objeto, embora sem ferimentos aos operadores.

- Ausência de sistema de aquecimento de água: A utilização de água em temperatura ambiente torna o processo de limpeza pouco eficiente. Considerando o local de operação e suas variações térmicas, a aplicação de água abaixo da temperatura especificada pelo manual pode causar choque térmico em peças que operam em alta temperatura. Isso pode resultar em microfissuras, rachaduras ou até quebras, além de não remover adequadamente as impurezas do ar atmosférico impregnadas nas partes fixas e móveis dos motores.
- Dependência de fonte externa de energia: Caso não haja uma fonte externa disponível, a aplicação da mistura para a limpeza dos compressores torna-se inviável. A bateria da aeronave, sozinha, não possui carga suficiente para suprir o consumo do camburão de lavagem e garantir o posterior acionamento dos motores.

8 MÉTODO SUGERIDO

A criação deste método consiste na concepção de um mecanismo de lavagem e limpeza dos motores, de forma a garantir melhor eficácia na limpeza dos compressores sem a utilização de aparatos externos à aeronave.

O reservatório de água será disposto no meio da fuselagem, podendo-se solicitar ao fabricante a disposição do reservatório em local diferente, conforme a melhor aplicabilidade do sistema para o operador. O propelente da água até o motor será realizado por meio de ar sob pressão, através da "sangria do motor", o que fará com que o reservatório seja pressurizado e aquecido, já que o ar proveniente do motor possui temperatura elevada. Assim, a temperatura em que a água será aplicada nas paletas dos motores será compatível com a especificada nos manuais. No caminho percorrido pela água, do reservatório até a aplicação no motor, será adicionado um elemento filtrante adequado para permitir a passagem somente de solução aquosa, sem partículas nem resíduos sólidos.

Foi utilizado um reservatório para o acondicionamento do ARDROX para que, quando houver necessidade de realizar a limpeza dos compressores, o detergente possa ser arrastado para o motor diretamente pela coluna de água proveniente do reservatório. Isso evita a necessidade de realizar a mistura fora do sistema, o que poderia vir a contaminá-la com algum tipo de agente externo.

A "sangria de ar do motor" é a retirada de ar sob pressão em locais definidos pelo fabricante na composição do sistema. Ela serve para obter parâmetros de funcionamento do motor, como pressão e temperatura de módulos, e também é utilizada para o arrefecimento de componentes, pressurização de selos, aquecimento do sistema hidráulico e conforto da tripulação.

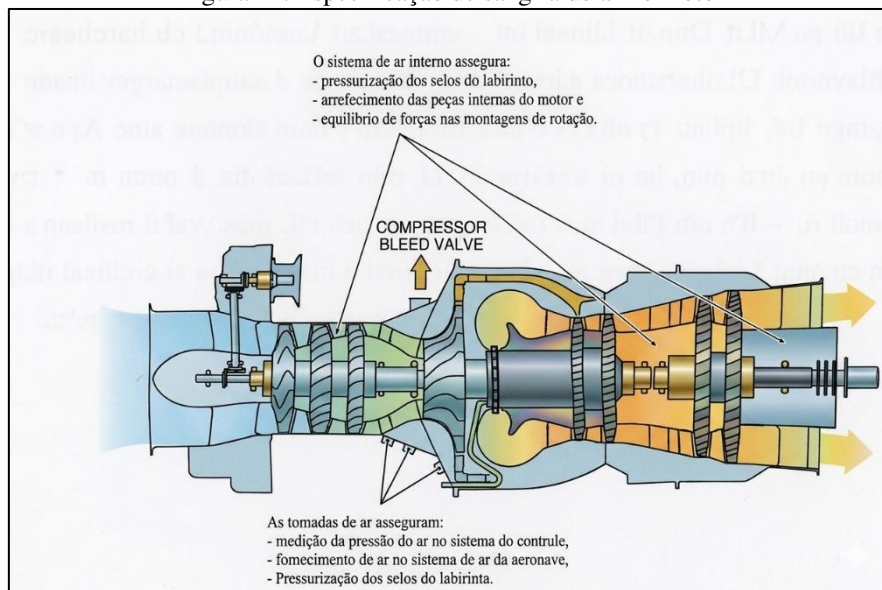


O sistema de ar do motor é composto por alguns subsistemas que possuem funções específicas, tais como:

- Um sistema de ar interno;
- Tomadas de ar;
- Uma válvula de purga do compressor.

O sistema de ar do motor é fundamental para o seu funcionamento seguro e eficiente, sendo composto por três elementos principais. Primeiramente, o sistema de ar interno atua na pressurização dos selos do labirinto, no arrefecimento das peças internas do motor e na manutenção do equilíbrio de forças nas montagens de rotação. Complementarmente, as tomadas de ar desempenham papéis cruciais ao permitir a medição da pressão do ar no sistema de controle, fornecer ar ao sistema geral da aeronave e auxiliar também na pressurização dos selos do labirinto. Por fim, o conjunto conta com uma válvula de purga do compressor (conhecida tecnicamente como compressor bleed valve), essencial para o controle do fluxo de ar.

Figura 22: Especificação de sangria do ar no motor



Fonte: MAKILA 2 A1 MAINTENANCE MANUAL, 2016

A chave de acionamento será disposta no console de comando dos pilotos e possuirá três posições: Limpeza, Lavagem e Descanso. O comando só será aceito quando todos os pré-requisitos para a aplicação de água estiverem atendidos, como, por exemplo: sistema de segurança indicando aeronave pousada, motor na posição *IDLE* e freio de estacionamento acionado. Caso alguma dessas condições não seja satisfeita, o sistema não aceitará o comando — mesmo que a chave seja colocada na posição desejada —, exibindo a mensagem "CLEANING FAIL" ou "WASH FAIL" no MFD (Painel Multifunção).

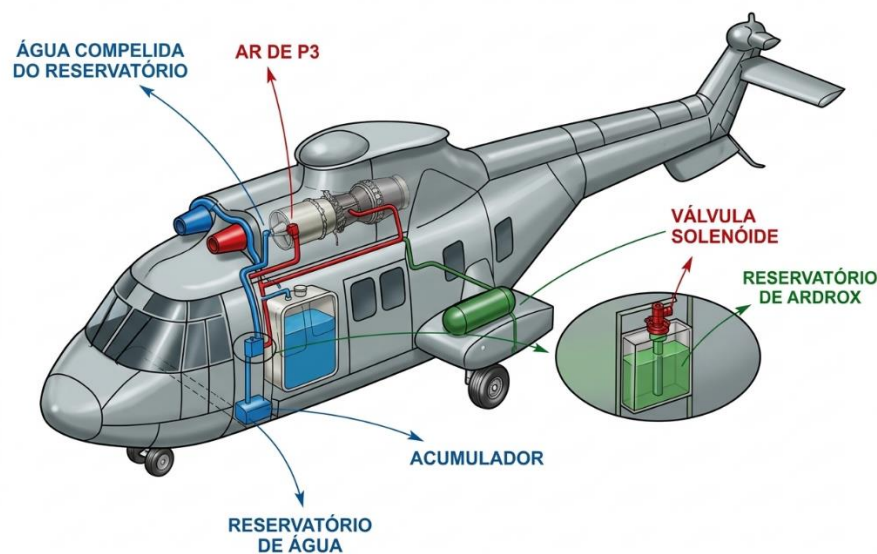


Após a conclusão do ciclo de injeção de água, o sistema comanda automaticamente a chave para a posição de descanso e informa, por meio de sinal audiovisual, o encerramento do procedimento. Assim, o comando de acelerar o motor para a secagem dos compressores volta a ficar à disposição do piloto.

Para a aplicação da água no procedimento de limpeza, o motor não estará acionado; portanto, não haverá pressurização do reservatório via sangria de ar. Para que este processo seja realizado, será instalado junto ao reservatório um sistema acumulador, responsável por propelir a água até o motor, arrastando o ARDROX de seu reservatório por efeito Venturi.

Sob a ótica da ergonomia, o abastecimento do reservatório ocorrerá pela parte externa da fuselagem, facilitando o trabalho do operador. Dependendo do tipo de operação do usuário, a concepção do reservatório poderá ser modificada para satisfazer suas necessidades específicas. Em certos tipos de operações, observa-se a dificuldade em adquirir água desmineralizada, o que deixa os motores sem lavagem por dias, acelerando o processo de incrustação de resíduos e a deterioração de suas partes internas.

Figura 23: Disposição da aplicação do Método Sugerido



Fonte: MAKILA 2 A1 MAINTENANCE MANUAL, 2016

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No decorrer da pesquisa, verificou-se que o método proposto elimina em onze minutos (11 min) o tempo de acionamento dos motores para o procedimento de lavagem de compressores. Isso ocorre porque o procedimento pode ser efetuado logo após o último voo do dia, sem a necessidade de corte dos motores e de um novo acionamento.

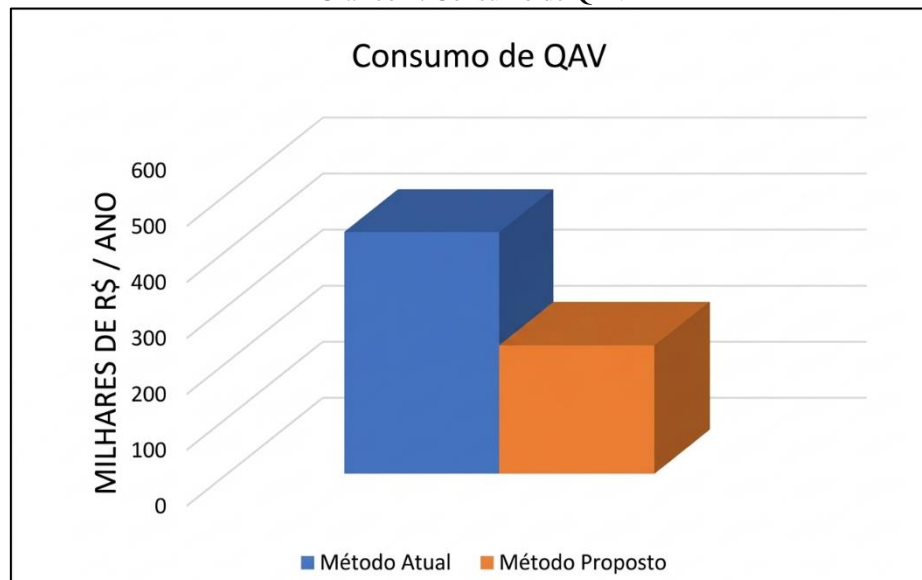


As economias pertinentes à eliminação do tempo de um novo acionamento correspondem à redução do consumo de combustível e de óleo, à diminuição da emissão de gases poluentes e à extensão dos intervalos entre as inspeções de manutenção.

A proposta de validação da estimativa de economia de combustível foi realizada com base no motor MAKILA 2 A1, que possui um consumo médio de 300 kg/h de QAV-1. Com a utilização do método proposto, a redução do consumo diário de QAV-1 será de 67,11 litros, o que gera uma economia de R\$ 563,69.

Quanto ao consumo de óleo lubrificante, o motor em questão consome 150 ml/h. Com o método proposto, haverá uma economia diária de cerca de 27,5 ml. Tais melhorias acarretam diretamente uma significativa diminuição na emissão de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, da ordem de 34,65 kg por dia.

Gráfico 2: Consumo de QAV



Fonte: Do Autor

No gráfico anterior observa-se uma paleta que destaca visualmente a economia de recursos:

- Azul (Método Atual): Representa o cenário de custo elevado, com gastos anuais próximos a R\$ 430 mil;
- Laranja (Método Proposto): Destaca o novo método, mostrando a redução drástica para aproximadamente R\$ 225 mil anuais.

Uma discussão quanto a análise da economia gerada:

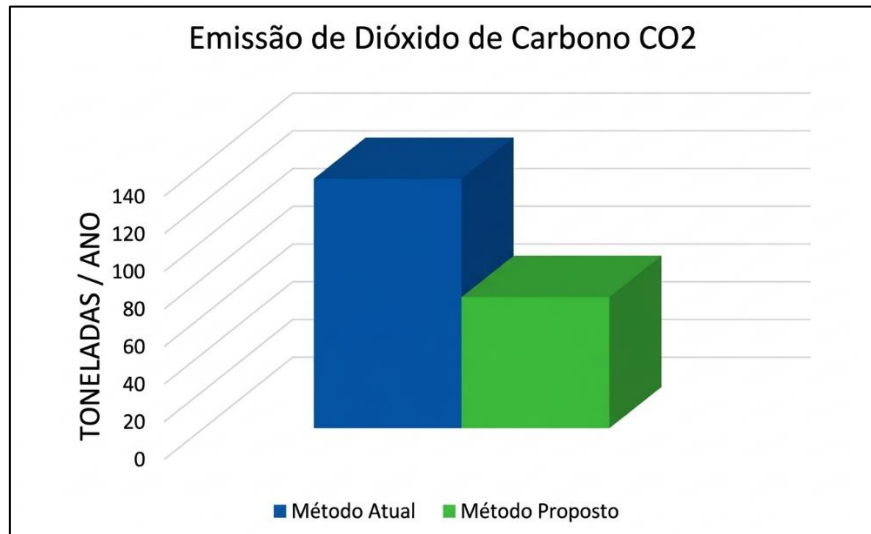
Redução Visual: É nítido que o novo método reduziu o gasto pela metade (quase 50% de economia direta em combustível).

Impacto Financeiro: A diferença entre as colunas representa uma economia real de aproximadamente R\$ 205.000,00 por ano apenas em QAV (Querosene de Aviação) por aeronave.



Eficiência Operacional: Além do ganho financeiro, a coluna laranja simboliza uma operação mais sustentável e com menor tempo de solo.

Gráfico 3: Emissão de Dióxido de Carbono



Fonte: Do Autor

No Gráfico anterior, foi utilizada uma paleta de cores que enfatiza o impacto ambiental positivo:

- Azul (Método Atual - 130 Ton/Ano): Representa a "pegada de carbono" elevada do processo atual, associada ao maior consumo de combustível e emissões mais altas.
- Verde (Método Proposto - 65 Ton/Ano): Representa a meta de sustentabilidade, mostrando uma redução significativa na poluição atmosférica.

Fazendo um discussão quanto a análise do impacto ambiental

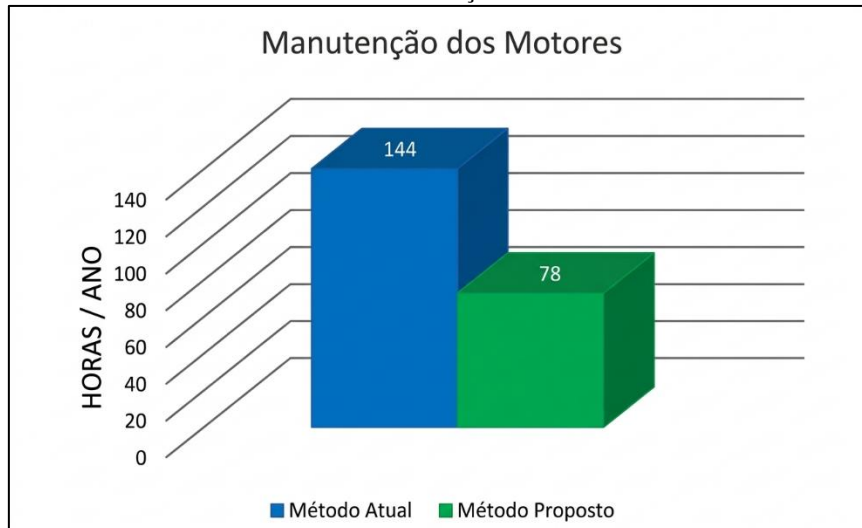
Redução de 50%: O novo procedimento corta exatamente pela metade a emissão de dióxido de carbono por ano.

Contribuição Ambiental: Uma redução de 65 toneladas de CO₂ por ano equivale ao plantio de centenas de árvores para compensar a mesma quantidade de carbono.

Sustentabilidade: Além da economia financeira que se observou no gráfico anterior, este dado fortalece a viabilidade do projeto perante metas ambientais internacionais.



Gráfico 4: Manutenção de Motores



Fonte: Do Autor

Já no gráfico 4, foi utilizada uma lógica que destaca a disponibilidade da aeronave:

- Azul (Método Atual - 130 Horas/Ano): Indica o tempo em que a aeronave fica parada para manutenção no modelo antigo.
- Verde (Método Proposto - 73 Horas/Ano): Indica a redução drástica no tempo de manutenção, o que significa que o helicóptero passará mais tempo disponível para voo.

Quanto a discussão desse gráfico, pode-se afirmar que:

Ganho de Tempo: O novo método economizou 57 horas por ano que antes eram gastas apenas com o processo de preparação e lavagem convencional.

Prontidão: Menos horas em manutenção significam que a tripulação e a aeronave estavam prontas para missões em um tempo muito menor.

Vida Útil: Além de ser mais rápido, o processo de lavagem frequente e eficiente (com água aquecida e pressurizada) reduz o desgaste a longo prazo.

Gráfico 5: Consumo de óleo lubrificante



Fonte: Do Autor



No gráfico 5, foram utilizadas tonalidades que remetem ao ambiente de manutenção e eficiência:

- Laranja Âmbar (Método Atual - 20 L/Ano): escolha da cor, por ser a tonalidade característica do óleo lubrificante novo, representando o volume maior consumido atualmente.
- Azul Marinho (Método Proposto - 10 L/Ano): Uma cor que transmite tecnologia e precisão, destacando a redução significativa no consumo.

Uma análise, uma redução de 50% com o novo método, conseguiu reduzir o consumo anual de óleo lubrificante exatamente pela metade (de 20 para 10 litros). Quanto a economia da logística, além do custo direto do produto, menos trocas de óleo significam menos descarte de resíduos químicos e menos tempo de aeronave parada para reabastecimento de sistemas. Já quanto a preservação, teve um menor consumo de óleo, ou seja, indicou que o motor está operando de forma mais "limpa" e com menor desgaste interno, resultado direto da lavagem eficiente do compressor.

10 CONCLUSÃO

É notório que a realização deste tipo de estudo torna-se extremamente relevante para empresas que utilizam aeronaves de asas rotativas em sua atividade-fim. Por meio desta pesquisa, obtiveram-se informações valiosas a respeito do comportamento da turbina, que apresenta melhora significativa após um procedimento de limpeza capaz de remover, com maior eficiência, as substâncias depositadas nos compressores.

Os resultados práticos validam essa evolução em todos os parâmetros. No aspecto econômico, a implementação do método proposto reduz os gastos anuais com combustível (QAV) de R\$430mil para aproximadamente de 225 mil, gerando uma economia direta de R\$ 205.000,00 por aeronave. Complementarmente, o consumo de óleo lubrificante foi reduzido em 50%, caindo de 20 para 10 litros anuais, o que otimiza a logística e reduz custos operacionais.

Sob a ótica da sustentabilidade, o impacto ambiental é expressivo: a emissão de dióxido de carbono foi mitigada em 65 toneladas de CO₂ por ano, cortando pela metade a pegada de carbono da operação. Além disso, a eficiência técnica reflete-se na disponibilidade da frota, com uma economia de 57 horas de manutenção por ano, permitindo que a aeronave e sua tripulação permaneçam prontas para missões por muito mais tempo.

Conclui-se, portanto, que os métodos convencionais tornaram-se obsoletos frente à tecnologia das aeronaves modernas. O estudo do motor MAKILA 2 A1 prova que a transição para o método proposto não apenas modela uma performance superior, mas garante a viabilidade financeira e o compromisso ambiental necessários para a aviação contemporânea.



REFERÊNCIAS

- 80 anos de propulsão a jato, 2017. Disponível em: <http://eaglesgate.com/index.html>. Acesso em: 13 out 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). Anuário do transporte aéreo 2016. Brasília: ANAC, 2016. (p. 1)
- AVIA.PRO. A utilização de helicópteros, 2015. Disponível em: <http://pt.avia.pro/blog/primenenii-vertoletov>. Acesso em: 20 out 2017.
- AVIASTAR. Sikorsky S-65 / CH-53 Sea Stallion, 2008. Disponível em: http://www.aviastar.org/helicopters_eng/sik_s-65.php. Acesso em: 20 out 2017.
- BARROS, A. J. S. e LEHFELD, N. A. S. Fundamentos de Metodologia: Um Guia para a Iniciação Científica. 2 Ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
- BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. Fundamentos de Metodologia: um guia para a iniciação científica. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000 (p. 34).
- BOYCE, Meherwan P. Gas turbine engineering handbook. 4. ed. Waltham: Elsevier, 2012. (*Referência sugerida para embasar a parte técnica de turbinas*).
- CASAGRANDE, Vinicius. Você sabe como funciona um motor de avião a jato? 2017. Disponível em: <https://todosabordo.blogosfera.uol.com.br/2017/01/05/voce-sabe-como-funciona-um-motor-a-jato-de-aviao/>. Acesso em: 13 out 2017.
- Conheça a Origem e Evolução dos Helicópteros, 2014. Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/conheca-a-origem-e-evolucao-dos-helicopteros/>. Acesso em: 12 out 2017.
- Conheça os Tipos de Motores a Reação, 2014. Disponível em: <http://blog.hangar33.com.br/conheca-os-tipos-de-motores-a-reacao/>. Acesso em: 13 out 2017.
- Cyclean. Disponível em: <https://www.lufthansa-technik.com/cyclean>. Acesso em: 5 out 2017.
- FIGUEIREDO, Antonio. Motores a Reação, 2011. Disponível em: <http://figueiredo1000.no.comunidades.net/motores-a-reacao>. Acesso em: 13 out 2017.
- GENTIL, Vicente. Corrosão. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.
- Glossário de Termos Técnicos, 2010. Disponível em: <http://eaglesgate.com/glossario3.htm>. Acesso em: 03 out 2017.
- Huadong Yang, Hong Xu, "The Effect of Surface Roughness on Thermodynamic Performance Parameter of Axial Flow Compressor", Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, 2013, 5(18)
- LITO, Sérgio. O que acontece quando o motor de um avião é lavado?. Blog Aviões e Músicas, 2014. Disponível em: (URL do site). Acesso em: 18 mar. 2026. (p. 1)
- MAKILA 2 A1. Maintenance Manual: Volume 3. Update No. 10. (S.l.): Turbomeca, 2016 (p. 35).

REINAS, Rafael Iglesias. Manutenção de aeronaves e gestão de custos. (S.l.: s.n.), 2001.

REINAS, Rafael Iglesias. Manutenção de aeronaves e gestão de custos. (S.l.: s.n.), 2001. (*Referência sugerida para conectar com os custos citados no texto*).

REINAS, Rafael Iglesias. Manutenção de aeronaves e gestão de custos. (S.l.: s.n.), 2001. (*Referência sugerida para embasar a análise de custos citada nos resultados*).

SILVA, João. Princípios básicos de manutenção de aeronaves. Revista de Engenharia Aeronáutica, v. 10, n. 2, 2023.

UOL. TAM economiza R\$ 7,7 milhões com lavagem de motores. São Paulo, 2014. Disponível em: (URL do site). Acesso em: 18 mar. 2026. (p. 2)

YANG, Huadong. Impact of particle deposition on engine performance. Journal of Aerospace Engineering, 2013.

YANG, Huadong; XU, Hong. The Sensitive Parameter Study of Axial Flow Compressor Fouling. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology, v. 5, n. 10, p. 3057-3062, 2013 (p. 34).

