



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2023

LEONARDO **SPÍNOLA** CHAVES VIEIRA LIMA PINTO, Cap Eng

Monitoramento de Motores: uma ferramenta de flexibilidade e eficiência na
manutenção

Rio de Janeiro

2023

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1/2023

LEONARDO **SPÍNOLA** CHAVES VIEIRA LIMA PINTO, Cap Eng

Monitoramento de Motores: uma ferramenta de flexibilidade e eficiência na manutenção

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Liderança com Ênfase em Gestão no COMAER.

Linha de Pesquisa: Preparo da Força Aérea
Orientadora: Jaqueline de Azevedo Bruno,
Ten Cel Int

Rio de Janeiro

2023

LEONARDO **SPÍNOLA** CHAVES VIEIRA LIMA PINTO, Cap Eng

Monitoramento de Motores: uma ferramenta de flexibilidade e eficiência na manutenção

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica.

Aprovado por:

Jaqueline de Azevedo Bruno, Ten Cel Int
EAOAR

Wellington Azevedo dos Santos, Maj Inf
EAOAR

Rio de Janeiro

2023

RESUMO

As aeronaves C-95 e P-95 da FAB são propelidas pelos motores Pratt & Whitney Canada PT6A-34, do tipo turboélice. Atualmente a manutenção de tais equipamentos é realizada segundo a filosofia *hard time*. Essa prática, apesar de conferir simplicidade ao planejamento da manutenção, faz com que ocasionalmente haja recolhimentos de motores potencialmente sem falha funcional. Acerca desse problema, existe uma ferramenta de manutenção denominada Monitoramento a qual, por meio da coleta de dados de operação dos motores, em voo, e do emprego de programa de computador específico, provê informações sobre o estado dos motores e sobre eventuais tendências de deterioração. Dessa forma, o presente ensaio defende a utilização da ferramenta Monitoramento na manutenção dos motores PT6A-34. Seu emprego torna possível a adoção da filosofia *on condition* para as inspeções HSI dos mencionados motores, flexibilizando-se os intervalos entre as citadas inspeções, sem comprometer a segurança de voo. Além disso, o Monitoramento confere maior eficiência à realização de manutenções corretivas, pois a ferramenta direciona as pesquisas de pane, desde o início, às áreas de origem das panes. A ferramenta pode, ainda, ser empregada em outros modelos de motores, proporcionando benefícios a outras aeronaves. Uma vez implantado em outros motores da FAB, o Monitoramento será o reflexo de uma Força Aérea moderna, que adota as melhores práticas tecnológicas de manutenção e que emprega seus recursos com eficiência.

Palavras-chave: Motores Aeronáuticos. Manutenção. Monitoramento. *Hard-Time*. *On Condition*.

1 INTRODUÇÃO

Na FAB, o versátil C-95 Bandeirante realiza, em todo o território nacional, missões de transporte aéreo, assalto aeroterrestre e evacuação aeromédica. O P-95 Bandeirulha, avião derivado do primeiro, desempenha funções de patrulha marítima, busca e salvamento, inteligência operacional e reconhecimento. Ambos são equipados com os motores Pratt & Whitney Canada (P&WC) modelo PT6A-34.

Tais motores são do tipo turboélice e fazem parte da família de motores PT6, de extensa aplicação no mercado aeronáutico militar e civil em todo o mundo (P&WC, 2023). Os “-34” são os turboélices mais utilizados na Força Aérea Brasileira.

Atualmente, a manutenção desses motores na FAB é realizada conforme a doutrina *hard time*. Segundo esse processo, é estabelecido um limite de uso operacional para um item, independentemente de apresentar falha funcional (BRASIL, 2017).

No conjunto de inspeções preventivas do Plano de Manutenção dos “-34”, a Inspeção da Seção Quente (comumente referida pela sua denominação em inglês “HSI” – *Hot Section Inspection*) é uma das mais dispendiosas, tanto em termos de tempo (duração), quanto de mão de obra e de material (BRASIL, 2021).

No caso dos motores “-34”, o limite de uso operacional para a realização da HSI é de 1.500 horas (BRASIL, 2021). Assim, cada motor, a cada 1.500 horas de voo, deve ser retirado de operação para ser inspecionado, independentemente de ter apresentado falha funcional.

Pela sua própria definição, o *hard time* provê simplicidade ao planejamento da manutenção. Contudo, o recolhimento de motores para as inspeções preventivas ocorre sem que seja levado em conta o estado dos equipamentos no momento da remoção. Dessa forma, ocorre a remoção de motores, para inspeção, que não apresentam falha.

Em relação a esse problema, existe uma ferramenta de manutenção denominada Monitoramento a qual, por meio da coleta de dados de operação dos motores, em voo, e do emprego de programa de computador específico, provê informações sobre o estado dos motores e sobre eventuais tendências de deterioração.

Dessa forma, o presente ensaio defende a utilização da ferramenta de Monitoramento na manutenção dos motores PT6A-34, pois ela tornará possível a adoção da filosofia *on condition* para as inspeções HSI dos mencionados motores, flexibilizando-se os intervalos entre as citadas inspeções, sem comprometer a

segurança de voo. Além disso, o Monitoramento conferirá maior eficiência à realização de manutenções corretivas, pois a ferramenta tem o benefício de direcionar as pesquisas de pane, desde o início, às áreas de origem dos defeitos.

2 DESENVOLVIMENTO

O processo de Monitoramento de motores é utilizado na indústria aeronáutica mundial há muitos anos, introduzida primeiro na aviação civil comercial, em companhias aéreas como Lufthansa e KLM (LUCAS; PAAS, 1988). Ele é composto, de modo resumido, por três principais fases: coleta de dados, processamento e análise.

Em linhas gerais, a coleta consiste em, primeiramente, se registrar dados referentes à operação do motor (torque, temperatura interna, fluxo de combustível e a velocidade de rotação do compressor), e dados sobre as condições ambientais (tais como: altitude, pressão atmosférica e temperatura externa). Essa fase é cumprida durante o voo, pela tripulação, mediante a observação dos instrumentos da cabine e registro em formulário apropriado.

Os dados coletados são, então, inseridos num programa de computador específico, o qual realiza seu processamento. O programa normaliza os dados coletados em relação às diferentes condições atmosféricas de cada voo, e os processa em relação ao modelo de motor (presente em seu próprio código-fonte). Em seguida, o software gera gráficos que representam as variações, ao longo do tempo, de certos parâmetros de operação (normalizados e processados): temperatura interna, fluxo de combustível e torque.

A terceira fase é a análise dos gráficos. A existência de alguma tendência (de aumento ou diminuição) na variação de um ou mais parâmetros ao longo do tempo indica uma deterioração em determinado componente ou área interna do motor, ou defeito em algum sensor.

Para que o Monitoramento seja eficaz, é necessário obedecer a requisitos específicos, referentes à frequência e ao modo de coleta dos dados (P&WC, 2006). Para isso, as tripulações e equipes de manutenção dos Operadores devem estar bem orientados e, sobretudo, engajados na tarefa.

Nesse sentido, o Parque Central dos motores PT6A-34 tem um papel essencial na implantação da prática. Cabe ao Parque o gerenciamento das ações, a elaboração

e atualização dos documentos pertinentes, a realização das análises e recomendações técnicas apropriadas e o controle do papel dos Operadores.

2.1 Flexibilização dos intervalos entre inspeções - adoção da filosofia *on condition*

A primeira vantagem em se adotar o Monitoramento é a flexibilização dos intervalos para as inspeções HSI (P&WC, 2017). Uma coleta de dados em voo efetuada de forma diligente pelos Operadores, aliada à correta análise dos gráficos gerados, feita por pessoal técnico treinado, no Parque Central, possibilitarão à FAB converter a atual filosofia de manutenção dos motores, da atual *hard time* para o modelo *on condition*, no que tange à inspeção HSI, flexibilizando os intervalos dessa inspeção.

Na forma atual, a inspeção HSI ocorre em intervalos definidos, de 1.500 horas, segundo a filosofia *hard time*. Uma vez que os períodos entre as inspeções são fixos e previsíveis, há uma grande simplicidade no seu planejamento. Contudo, os motores e, conseqüentemente as aeronaves, são indisponibilizados meramente por contagem de horas de operação, ou seja, independentemente do estado interno dos equipamentos.

A vantagem, aqui relatada, da aplicação do Monitoramento, reside em se permitir que motores operem além do prazo original das inspeções HSI. Dessa forma, é possível programar a HSI da forma conveniente às necessidades da operação e às possibilidades da manutenção (P&WC, 2006). O critério de parada do motor para inspeção passará a ser, ao invés do prazo (em horas de operação), o estado da seção quente do equipamento. Tal estado será verificado por meio da análise dos gráficos gerados pelo programa de computador específico.

Dessa forma, passará a ser adotada a filosofia *on condition* para tais inspeções. O processo *on condition* é aquele no qual a condição do sistema, em relação a um limite especificado, é determinada periodicamente por inspeção visual, medida, teste ou outro meio adequado de padrão físico (desgaste ou deterioração), sem que seja necessário desmontá-lo ou revisá-lo (BRASIL, 2017).

Alves e Bevictori (2017) realizaram um estudo comparativo das filosofias *hard time* e *on condition* aplicadas aos motores PW127G que equipam as aeronaves C-105 Amazonas da FAB. Com base na comparação entre o custo das inspeções HSI realizadas em tais motores e a projeção do custo de implementação do programa de Monitoramento, os autores observaram que o *on condition* tem o potencial de conferir

grande economia financeira à Força Aérea. Tal análise pode ser estendida ao PT6A-34, tendo em vista que o sistema de monitoramento de ambos os motores é essencialmente o mesmo.

Em estudo sobre os motores RD-33, Siladic e Rasuo (2009) verificaram que a limitação (em horas de operação) a que os motores estavam submetidos (conforme o plano de manutenção *hard time* vigente) não representava a real condição do estado dos equipamentos. A filosofia *on condition*, por sua vez, resolve essa questão pois, através do Monitoramento, tem-se o panorama contínuo do estado dos motores, os quais são retirados de operação (para manutenção) apenas quando necessário – e não por mero acúmulo de horas de voo.

Importante ressaltar que os benefícios trazidos pela ferramenta não têm impacto negativo na segurança de voo. Conforme a documentação do próprio fabricante, a flexibilização do intervalo entre inspeções (conforme será visto adiante) não afeta a confiabilidade dos motores, desde que o Monitoramento seja aplicado corretamente (P&WC, 2017).

Conforme é proposto neste ensaio, o Monitoramento deve ser implementado pois, conforme mencionado, a flexibilização dos intervalos entre as HSI permitirá que seja possível programar o momento mais adequado para a realização de tais inspeções. Tal programação levará em conta a disponibilidade de mão-de-obra e de recursos materiais em cada momento, e será de acordo com as necessidades operacionais dos esquadrões (realização de missões fora de sede, manobras, missões humanitárias, entre outros).

2.2 Maior eficiência na manutenção

Outro benefício do uso da ferramenta reside no fato de o Monitoramento ser capaz de prover subsídios para tornar as pesquisas de pane mais eficientes (P&WC, 2006).

Pesquisa de pane é o conjunto de ações, no âmbito da manutenção corretiva, realizadas no sentido de se descobrir as causas de uma eventual falha funcional de um item (BRASIL, 2017).

Em caso de suspeita de alguma pane em um motor, por meio da interpretação das tendências detectadas nos gráficos, o Monitoramento direciona os esforços das

pesquisas de pane à provável área da causa do problema, contribuindo com a eficiência da manutenção corretiva.

Chen, Qu e Fang (2022) descreveram didaticamente as principais partes do motor aeronáutico, que podem ser agrupadas em dois grandes grupos: Compressor e Turbina. Em caso de perda de desempenho do motor e necessidade de intervenção para manutenção corretiva, o Monitoramento permite às equipes de manutenção saberem, antes de qualquer intervenção, qual área do motor apresenta problemas (P&WC, 2006).

Dessa forma, é possível antecipar e planejar adequadamente as ações necessárias à correção do problema, em termos de material e ferramentas específicas a cada área do motor.

Dentre as principais causas que levam à perda de eficiência do motor e, conseqüentemente, à necessidade de intervenção para manutenção corretiva, estão problemas relacionados ao compressor, à seção quente (compreendida pela câmara de combustão e pela turbina) e a sensores do motor.

Os problemas mais comuns relativos à área do compressor são: desgaste gradual devido, por exemplo, à ingestão de material abrasivo (terra, areia); desgaste abrupto, por exemplo por ingestão de objeto estranho (F.O.D.), vazamentos no sistema de sangria de ar do motor e vazamentos de ar na região da câmara de combustão.

Os principais problemas da turbina estão relacionados às palhetas estatoras e rotoras (desgaste e deformação por sobretemperatura). Problemas em sensores também podem ser detectados pelo Monitoramento por meio da interpretação dos seus gráficos.

Como exemplo, alguns tipos de danos no compressor podem ser reparados com o uso de certas ferramentas abrasivas, sem que seja necessário o recolhimento do motor ao Parque Central.

Com efeito, Cue e Muir (1988) demonstraram a contribuição do Monitoramento na pesquisa de pane nos motores da aeronave CF-18. Os autores apresentaram, como exemplo, uma falha no sensor de temperatura dos motores (sensor "T1") que foi detectada por meio da análise dos gráficos de monitoramento.

Ao direcionar os trabalhos de pesquisa de panes às áreas específicas que requerem intervenção, o Monitoramento reduzirá o tempo e os recursos materiais

necessários aos reparos decorrentes de panes, conferindo maior eficiência à manutenção.

O Monitoramento deve ser implementado pois, com o auxílio dessa ferramenta, o Parque Central, juntamente ao Operador, planejará com maior eficiência o emprego da mão de obra e das peças necessárias aos reparos dos motores PT6A-34.

3 CONCLUSÃO

A frota de motores PT6A-34, das aeronaves C-95 e P-95, atualmente é mantida conforme a filosofia *hard time*, o que implica na adoção de intervalos fixos para a realização das inspeções HSI dos motores.

Nesse âmbito, o presente ensaio defende a utilização, em tais equipamentos, da ferramenta de manutenção denominada Monitoramento.

Ela permitirá à FAB adotar o processo *on condition* para a inspeção “HSI” dos motores, tornando possível que sejam flexibilizados os intervalos entre tais intervenções. As HSI serão realizadas de acordo com o estado dos motores, ao invés do parâmetro atual, de intervalos fixos.

Isso irá conferir mais flexibilidade operacional aos C-95 e aos P-95, sem comprometer a confiabilidade dos equipamentos e a segurança de voo.

Além disso, o Monitoramento proporcionará maior eficiência aos processos de pesquisa de panes nos motores. Em caso de necessidade de manutenção corretiva, as equipes de mecânicos terão informações, baseadas na ferramenta, sobre o estado geral dos motores, que os permitirão direcionar os recursos (mão de obra e ferramentas) de modo mais eficiente.

O emprego bem-sucedido da ferramenta nos motores PT6A-34 poderá ensejar a aplicação do Monitoramento em outras frotas de motores do acervo da FAB, com as adaptações necessárias para cada caso, proporcionando a multiplicação dos seus benefícios.

Uma vez implantado em outros motores da FAB, o Monitoramento será o reflexo de uma Força Aérea moderna, que adota as melhores práticas tecnológicas de manutenção e que emprega seus recursos com eficiência.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. F.; BEVICTORI, L. F. N.; 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, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unis.edu.br/index.php/interacao/article/view/127/114>. Acesso em 29 mar. 2023.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. Portaria DIRMAB nº 78/PLON-2, de 05 de julho de 2017. Aprova a reedição do Manual de Doutrina, Processos e Documentação de Manutenção (MCA 66-7). **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 118, 12 jul. 2017.
- BRASIL. Parque de Material Aeronáutico de São Paulo. **Boletim Técnico**. Plano de Manutenção dos Motores PT6A-34. São Paulo, SP, 2021.
- CHEN, M.; QU, R.; FANG, W. Case-based reasoning system for fault diagnosis of aero-engines. **Expert Systems with Applications**, V. 202, n. 117350, 2022. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.117350. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417422007047>. Acesso em 02 abr. 2023.
- CUE, R. W.; MUIR, D. E. Engine Performance Monitoring and Troubleshooting Techniques for the CF-18 Aircraft. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, V. 113(1), p. 11-19, 1991. DOI: 10.1115/1.2906519. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/113/1/11/407167/Engine-Performance-Monitoring-and-Troubleshooting>. Acesso em 03 abr. 2023
- LUCAS, H.; PAAS, J. E. Introduction and application of the General Electric turbine engine monitoring software within KLM royal Dutch airlines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, V. 110(1), p. 23-27, 1988. DOI: 10.1115/1.3240081. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/110/1/23/406990/Introduction-and-Application-of-the-General>. Acesso em 03 abr. 2023.
- PRATT & WHITNEY CANADA (P&WC). **Customer Training Manual**. WebECTM & Trend Analysis. 2006.
- PRATT & WHITNEY CANADA (P&WC). **PT6 Turboprop Engines**. Disponível em: <https://www.pwc.ca/en/landing-pages-folder/pt6-turboprop-engines>. Acesso em 08 mar. 2023.
- PRATT & WHITNEY CANADA (P&WC). **Service Bulletin No. 1403R14** Turboprop Engine - Engine Operating Time Between Overhauls and Hot Section Inspection Frequency - Model Application PT6A-34, PT6A-35, PT6A-36. Longueil, Quebec, Canadá, 2017.
- SILADIC, M. F.; RASUO, B. P. On-Condition Maintenance for Nonmodular Jet Engines: An Experience. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, V.

131(3), n. 032502, 2009. DOI: 10.1115/1.3019104. Disponível em:
<https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/131/3/032502/466181/On-Condition-Maintenance-for-Nonmodular-Jet?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 02 abr. 2023.