

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área de Projetos Aeronáuticos, Estruturas e Sistemas Aeroespaciais.

Alexandre Alli Pereira

**PREDIÇÃO DO DESPRENDIMENTO DE PARTÍCULAS
EM AERONAVES EC 725 POR ANÁLISE DE
VIBRAÇÕES E DADOS DE VOO POR APRENDIZADO
DE MÁQUINA**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Airton Nabarrete

Orientador

Prof^a. Dr^a. Emília Villani

Pró-Reitora de Pós-Graduação

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP - Brasil
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Pereira, Alexandre Alli

Predição do Desprendimento de Partículas em Aeronaves EC 725 por Análise de Vibrações e Dados de Voo por Aprendizado de Máquina / Alexandre Alli Pereira.
São José dos Campos, 2023.
97f.

Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Área de Projetos Aeronáuticos, Estruturas e Sistemas Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023.
Orientador: Prof. Dr. Airton Nabarrete.

1. EC 725 AP. 2. Desprendimento de Partículas. 3. Árvore de Decisão. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Predição do Desprendimento de Partículas em Aeronaves EC 725 por Análise de Vibrações e Dados de Voo por Aprendizado de Máquina.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, Alexandre Alli. **Predição do Desprendimento de Partículas em Aeronaves EC 725 por Análise de Vibrações e Dados de Voo por Aprendizado de Máquina.** 2023. 97f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Alexandre Alli Pereira

TÍTULO DO TRABALHO: Predição do Desprendimento de Partículas em Aeronaves EC 725 por Análise de Vibrações e Dados de Voo por Aprendizado de Máquina.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2023

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Alexandre Alli Pereira

Rua H9A, Ap. 304

12.228-610 – São José dos Campos–SP

PREDIÇÃO DO DESPRENDIMENTO DE PARTÍCULAS EM AERONAVES EC 725 POR ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E DADOS DE VOO POR APRENDIZADO DE MÁQUINA

Alexandre Alli Pereira

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Carlos d'Andrade Souto	Presidente	-	ITA
Prof. Dr.	Airton Nabarrete	Orientador	-	ITA
Profa. Dra.	Ana Carolina Lorena	Membro Interno	-	ITA
Prof. Dr.	Amarildo Tabone Paschoalini	Membro Externo	-	UNESP

A todos que dedicam suas carreiras em prol da aviação militar e, ante as adversidades, não se permitem simplesmente culpar o sistema.

Agradecimentos

A Deus, por me guiar no caminho trilhado ao longo do Mestrado, sobretudo nos dias mais difíceis.

À minha esposa Sayonara, pelo otimismo em toda e cada pequena ideia (bem sucedida ou não) planejada e executada para compor este trabalho.

A todos os meus familiares, especialmente meus pais, com quem sempre pude contar para resolver as mais urgentes situações.

Ao Prof. Dr. Airton Nabarrete, pelo pronto apoio a orientar esta dissertação. Sua serenidade e confiança depositadas foram decisivas para que pudesse concluí-la.

À Marinha do Brasil, por investir na minha formação ao me conceder a oportunidade de realizar esta pós-graduação e confiar que dela trarei retornos à Força e ao país.

Ao amigo Capitão-Tenente Lucas Lobianco, por sua boa vontade inabalável em ajudar a coletar e gerenciar dados. Ao Capitão-de-Mar-e-Guerra Alex Evangelista de Almeida, por todo apoio pessoal e administrativo junto à Diretoria de Aeronáutica da Marinha durante o curso. Ao Tenente-Coronel Damy, por todo valioso conhecimento técnico das diversas normas da aviação militar, particularmente aquelas aplicáveis à aeronave EC 725. A todos os demais militares e servidores civis do Instituto de Fomento e Coordenação Industrial, pelos ensinamentos compartilhados no período em que servi no Instituto, sobretudo quanto à segurança de aviação.

Aos doutorandos Tenente-Coronel Guilherme M. Bedini Moreira e Denis Komnina-kis, pelo entusiasmo para com este trabalho e pela valorosa contribuição no tratamento estatístico das dezenas de milhares de dados de voo que dispúnhamos.

*“Fazer o que acredita e
acreditar no que faz.”*
— AUTOR DESCONHECIDO

Resumo

As elevadas cargas dinâmicas de alta frequência a que engrenagens e mancais de helicópteros são submetidos acarretam, naturalmente, desprendimento de partículas as quais passam a circular em suas linhas de óleo. As causas do desprendimento destas partículas estão associadas a vibrações nas engrenagens da caixa de transmissão principal que, por sua vez, levam a fraturas por fadiga, eventualmente culminando em uma falha catastrófica. A fim de manter a segurança de voo, a fabricante da aeronave EC 725 AP estabeleceu certos critérios relacionados à quantidade, área, comprimento, formato ou material das partículas desprendidas, de forma que, caso estes critérios sejam atingidos, a operação da aeronave deve ser interrompida para realização de manutenção da caixa de transmissão principal. Por conta do critério de partículas, cerca de metade da frota militar brasileira da aeronave EC 725 AP teve sua operação interrompida centenas de horas de voo antes do tempo nominal previsto para a revisão da caixa de transmissão principal, incorrendo em um transtorno logístico e operacional. A fim de mitigar o problema, este trabalho propõe a utilização de algoritmos de aprendizagem de máquina para identificar os parâmetros de voo correlacionados aos desprendimentos de partículas da caixa de transmissão principal da aeronave EC 725 AP, operada pelas três Forças Armadas brasileiras. A partir da comparação com outras referências bibliográficas bem como a análise da própria consistência dos resultados, foi constatado que a técnica árvore de decisão é adequada para tal fim. Através da aplicação da referida técnica em uma base contendo dados de uma centena de voos, o parâmetro temperatura máxima do óleo motor acima de 112 °C foi observado como o principal parâmetro de voo associado ao desprendimento de partículas da caixa de transmissão principal da EC 725 AP. A relevância desta dissertação consiste em aplicar um método de aprendizagem de máquina não diretamente nos dados de vibração capturados pelo *Health and Usage Monitoring Systems* (HUMS), mas sim nos dados de voo capturados pelo *Flight Data Record* (FDR). Esta abordagem é particularmente útil porquanto oferece aos operadores da aeronave uma outra fonte de indicação de fraturas - e, conseqüentemente, desprendimento de partículas - além dos dados de vibração fornecidos pelo HUMS.

Abstract

High-frequency dynamic loads that helicopter gears and bearings are subjected to naturally lead to particle detachment, which circulate in their oil lines. The causes of these particle detachments are associated with vibrations in the main transmission box gears, which, in turn, lead to fatigue fractures, possibly culminating in a catastrophic failure. To maintain flight safety, the manufacturer of the EC 725 AP aircraft established certain criteria related to the quantity, area, length, shape, or material of the detached particles. If these criteria are met, the aircraft operation must be interrupted for maintenance of the main transmission box. Because of the particle criteria, about half of the Brazilian military fleet's EC 725 AP aircraft operation was interrupted hundreds of flight hours before the nominal time expected for the main transmission box review, leading to a logistical and operational inconvenience. To mitigate the problem, this work proposes using machine learning algorithms to identify flight parameters correlated with the particle detachments from the main transmission box of the EC 725 AP aircraft, operated by the three Brazilian Armed Forces. Comparisons with other bibliographic references and an analysis of the results' consistency revealed that the decision tree technique is suitable for this purpose. Applying this technique to a database containing data from a hundred flights, the parameter maximum engine oil temperature above 112 °C was identified as the main flight parameter associated with the detachment of particles from the EC 725 AP's main transmission box. The relevance of this thesis involves applying a machine learning method not directly on the vibration data captured by the *Health and Usage Monitoring Systems* (HUMS), but on the flight data captured by the *Flight Data Record* (FDR). This approach is particularly useful as it provides aircraft operators another source of fracture indication, and consequently, particle detachment, in addition to the vibration data provided by the HUMS.