



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
DIVISÃO DE ENSINO
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2025

THIAGO DE DEUS HENRIQUES MIRANDA, Cap Esp Av

Aplicação da ferramenta de Inteligência Artificial para as manutenções preditivas das aeronaves F-39 da Força Aérea Brasileira

Rio de Janeiro

2025

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
DIVISÃO DE ENSINO
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2025

THIAGO DE DEUS HENRIQUES MIRANDA, Cap Esp Av

Aplicação de ferramenta de Inteligência Artificial para as manutenções preditivas das aeronaves F-39 da Força Aérea Brasileira

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola 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: uso de inteligência artificial
Orientador: Carlos Eduardo José da Silva, Ten Cel Esp Av

Rio de Janeiro

2025

THIAGO DE DEUS HENRIQUES MIRANDA, Cap Esp Av

Aplicação de ferramenta de Inteligência Artificial para as manutenções preditivas das aeronaves F-39 da Força Aérea Brasileira

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Escola
de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica.

Aprovado por:

Presidente, Carlos Eduardo José da Silva, Ten Cel Esp Av R1 - EAOAR

Thais Lemgruber Americo, Cap Av - EAOAR

Rio de Janeiro

2025

RESUMO

Alinhado ao Plano Estratégico Militar da Aeronáutica (PEMAER) e visando ao suporte logístico dos macroprocessos finalísticos do Comando da Aeronáutica (COMAER), Emprego e Preparo, as Bases Aéreas desempenham papel fundamental na garantia da máxima disponibilidade de suas frotas de aeronaves. A Base Aérea de Anápolis, por meio do Esquadrão de Manutenção, é responsável pelo suporte à operação das aeronaves F-39, operadas pelo 1º Grupo de Defesa Aérea. Para isso, buscando novas metodologias de gestão, este ensaio defende que a adoção de uma ferramenta de Inteligência Artificial (IA) nas manutenções preditivas do F-39 aumenta a eficiência do Esquadrão de Manutenção da Base Aérea de Anápolis. Primeiramente, argumenta-se que a utilização de IA, especificamente de *Machine Learning* (ML), aumentará a disponibilidade da frota, pois, em caso de falha, permitirá a solicitação antecipada de ordens técnicas faltantes e materiais de apoio, conciliando essa providência a respectiva ação corretiva. Ainda, sustenta-se que a utilização de ML reduzirá custos, pois otimizará a vida útil dos componentes, evitando substituições prematuras e garantindo processos de compras economicamente vantajosos para a administração, dada a identificação precisa da falha. Conclui-se que a aplicação de ferramenta de IA na manutenção preditiva do F-39, em um contexto mais amplo, não apenas contribuirá com a eficiência do Esquadrão de Manutenção, mas atenderá à diretriz logística do PEMAER relativa ao aprimoramento da manutenção preditiva de equipamentos de interesse do COMAER. Este cenário resultará em melhor preparação de equipagens, logo, em maior prontidão operacional com vistas à vigilância e à defesa do espaço aéreo.

Palavras-chave: disponibilidade; redução de custos; inteligência artificial; manutenção preditiva.

1 INTRODUÇÃO

Em consonância com o Plano Estratégico Militar da Aeronáutica (PEMAER), o setor de logística de uma Base Aérea desempenha papel fundamental na garantia da máxima disponibilidade de suas respectivas frotas de aeronaves (Brasil, 2024). De forma específica, tendo como principais clientes o 1º Grupo de Defesa Aérea (1º GDA) e a sociedade brasileira, a seção de manutenção das aeronaves F-39 (Gripen) da Base Aérea de Anápolis (BAAN) situa-se no Macroprocesso de Suporte – Apoio Logístico, cujas atividades estão relacionadas à suportabilidade logística dos macroprocessos finalísticos do Comando da Aeronáutica (COMAER), quais sejam: o Emprego e o Preparo (Brasil, 2018).

Nesse mesmo diapasão, o Manual de Manutenção - doutrina, processos e documentação de manutenção conceitua disponibilidade como “uma medida do grau de prontidão operacional de uma aeronave ou sua frota fins de realizar a missão para a qual é empregada de uma maneira satisfatória sob cenários pretendidos” (Brasil, 2017, p. 227). Na Força Aérea Brasileira (FAB), para o cumprimento das metas operacionais anuais, há o estabelecimento de um percentual mínimo de disponibilidade para cada tipo de aeronave do acervo. Para o atingimento desses índices, há três tipos básicos de intervenção de manutenção: preventivas, preditivas e corretivas.

Considerando como enfoque deste trabalho a manutenção preditiva do F-39, Barbosa (2023) conceitua esse método como um tipo de intervenção que prevê antecipadamente as falhas utilizando-se de dados e tecnologias para a redução do tempo de parada de equipamentos. Para isso, “buscando aprimorar a metodologia de manutenção preventiva e **preditiva** nos equipamentos e sistemas de interesse do COMAER” (Brasil, 2024, p. 40, grifo nosso), além das ferramentas já consolidadas, urge a necessidade de aplicação de novas metodologias de gestão. Nesse viés, este ensaio defende que a adoção de uma ferramenta de Inteligência Artificial (IA) nas manutenções preditivas do F-39 aumenta a eficiência do Esquadrão de Manutenção da Base Aérea de Anápolis.

Para fundamentar essa tese, argumenta-se que a utilização da ferramenta de IA resultará no aumento da disponibilidade da frota, pois contribuirá para o mapeamento prévio das falhas, permitindo a solicitação antecipada à SAAB e ao Parque Apoiador de diversas instruções técnicas, materiais de apoio e consumíveis faltantes. Adicionalmente, essa ferramenta reduzirá os custos logísticos e operacionais do projeto, pois permitirá a utilização dos componentes do Gripen em toda a sua vida útil e, em cenários mais restritivos, a extensão de seus intervalos de troca.

2 DESENVOLVIMENTO

A logística militar, dentre os diversos ramos de atuação, é responsável pela manutenção da frota de aeronaves dotadas nas diversas Bases Aéreas distribuídas pelo território nacional. Para isso, utilizam-se de diversos conceitos e ferramentas de gestão a fim de tornar este processo o mais eficiente possível, maximizando a quantidade de aviões na linha de voo ao menor custo.

Operados pelo 1º GDA, os F-39 são mantidos pelo Grupo Logístico de Anápolis (GLOG-AN), o qual é apoiado pelo Comando Geral de Apoio (COMGAP) por meio do Parque de Material Aeronáutico de São Paulo (PAMA-SP), unidade subordinada responsável por todo o suporte logístico, desde o fornecimento de peças de reposição até a obtenção e distribuição de instruções técnicas.

O Parque apoiador, PAMA-SP, em aproveitamento à fase de desenvolvimento e implantação, frequentemente recorre à fabricante, Svenska Aeroplan Aktiebolaget (SAAB), para solicitar apoio a processos ainda não internalizados pela logística da FAB. A eficiência desse suporte, associada à sinergia dessa interação, traz benefícios diretos à rotina administrativa do Esquadrão de Manutenção, entidade integrante do GLOG-AN, pois garante a disponibilidade (em tempo) de todos os recursos necessários para a execução bem-sucedida das ações de manutenção.

2.1 AUMENTO DA DISPONIBILIDADE

O F-39, em fase de desenvolvimento e implantação, tem apresentado diversos desafios para a logística, os quais, em termos práticos, refletem em um cenário com ordens técnicas incompletas, além de materiais de apoio e peças de reposição faltantes. Tais variáveis têm impactado diretamente os índices logísticos do Gripen que, conforme dados do sistema de controle de frota *Aircraft Maintenance Management System* (AMMS), apresentou, em 2024, uma disponibilidade média 11,63% abaixo do previsto contratualmente.

Na rotina de operação, o contexto de desenvolvimento e implantação tem conduzido os gestores de manutenção do GLOG-AN a atuarem de forma reativa, solicitando procedimentos técnicos e materiais de apoio à SAAB e ao Parque Apoiador somente após a ocorrência de uma falha. Isso aumenta consideravelmente o tempo de parada da aeronave, pois, além do tempo previsto para ação corretiva, a fabricante tem demandado, em média, 8,7 dias para envio dos materiais de apoio e para emissão do *Statement to Operator* (STO), documento técnico que embasa a correção da falha.

Para mitigar essa dependência da fabricante, urge a necessidade de implementação de novas ferramentas para melhoria dos processos de manutenção preditiva do F-39. Nesse sentido, ferramentas de IA apresentam-se como uma alternativa viável, uma vez que Wuest *et al.* (2016) propõem o uso de *Machine Learning* (ML) como uma técnica promissora para análise de sistemas complexos com dados de alta dimensão e multivariados, tal como o contexto de manutenção apresentado.

Como uma ferramenta da IA, o *Machine Learning* pode ser definido “como o conjunto de métodos capazes de detectar padrões automaticamente num conjunto de dados e usá-los para fazer previsões sobre dados futuros, ou para tomar outro tipo de decisões num ambiente de incerteza” (Barbosa, 2023, p. 31).

Para subsidiar o modelo com dados reais, o Gripen conta com diversas estações de apoio à manutenção, dentre elas o *Maintenance Ground Support System* (MGSS). Esse sistema é capaz de extrair cerca de 10.000 parâmetros por missão, por intermédio do download de dados armazenados no *Data Transfer Unit – Ground Crew* (DTU-GC), espécie de *Hard Disk* (HD) que é conectado à aeronave durante a missão. Esses parâmetros incluem uma variedade de dados, tais como: posição de superfícies de comando de voo, relés, atuadores, trem de pouso, manche, válvulas, parâmetros de motor, dentre outros.

A aplicação de *Machine Learning* para detecção precoce de potenciais falhas em componentes críticos de motores de aeronaves foi discutida por Bentaleb, Toumlal e Abouchabaka (2024). Os autores discorrem sobre a versatilidade dos métodos empregados em seus estudos para a análise dos dados gerados pelo *Commercial Modular AeroPropulsion System Simulation* (C-MAPSS) com a trajetória de falhas simuladas de quarenta motores.

Na mesma linha, Al-Khulaqi *et al.* (2025) demonstram a contribuição de determinados modelos de *Machine Learning* para a disponibilidade de sistemas hidráulicos monitorando, por intermédio de sensores, a operação de cinco componentes críticos, quais sejam: trocador de calor, válvula de controle de fluido, bomba, acumulador e o indicador de saúde do sistema.

Ao analisar os estudos anteriores, verifica-se que o contexto da manutenção do Gripen é análogo, uma vez que também se trata de um sistema complexo com grande disponibilidade de dados de operação provenientes do MGSS. É notória a capacidade dos modelos de ML em mapear componentes e sistemas evidenciando seus estados de degradação, possibilitando assim a previsão com precisão das necessidades de manutenção para cada matrícula.

De posse dessas estimativas, o gestor de logística poderá adotar uma abordagem proativa, solicitando as informações técnicas e materiais de apoio ao PAMASP e à fabricante antes da ocorrência da falha, mitigando o tempo de providência das entidades apoiadoras,

reduzindo o tempo de parada da aeronave e, conseqüentemente, elevando os índices de disponibilidade do projeto.

Em suma, entendendo que a disponibilidade é uma variável diretamente proporcional à eficiência de qualquer processo de manutenção, pode-se afirmar que seu incremento, por intermédio da aplicação da ferramenta de ML, aumenta a eficiência do Esquadrão de Manutenção da BAAN, fração responsável pelo apoio logístico às aeronaves F-39.

2.2 REDUÇÃO DE CUSTOS TOTAIS

Durante a concepção de um novo projeto, é consenso que diversos ensaios são realizados em seu protótipo com o propósito de mensurar os limites de desgaste e fadiga não só da aeronave, mas também de seus componentes. No caso do Gripen, desenvolvido pela SAAB, grande parte dessas amostragens foi realizada em território sueco, que apresenta características ambientais bastante peculiares, totalmente distintas do cenário brasileiro.

Por ter sido submetido a diferentes intempéries, há de se convir que, durante a operação em território nacional, a aeronave e seus componentes poderão apresentar índices reais de taxa de falha diferentes dos estabelecidos pela fabricante. Esse cenário de incertezas pode conduzir a equipe de manutenção a realizar intervenções desnecessárias não pautadas pelo limite real do componente, mas sim pelas barreiras calendárias ou horárias impostas pela fabricante para aquele item em específico.

Essas divergências, além de impactarem na disponibilidade, contribuem diretamente para o incremento dos custos totais do projeto, dada a grande possibilidade de substituição de componentes que, mesmo tendo alcançado o tempo previsto para revisão, ainda podem apresentar elevados índices de confiabilidade quando operados em terras brasileiras. De forma geral, a substituição prematura de componentes representa custos adicionais não só pela necessidade de maior quantidade de revisões, mas também pelo baixo aproveitamento do recurso investido no item retirado precocemente de operação.

Além disso, a precisão no calendário de substituição permite um planejamento adequado das atividades de manutenção, possibilitando processos de compra cadenciados e a seleção de opções mais vantajosas economicamente para a administração. Via de regra, a falta de previsibilidade induz a compras emergenciais em que a alta dependência de fornecedores resulta em elevados preços para aquisição e reparo.

Ratificando esse pensamento, Khan *et al.* (2021) evidenciam como as técnicas de *Machine Learning* contribuem com o monitoramento da condição de equipamentos. Como

resultado, exploram a contribuição dessas ferramentas para a manutenção preditiva de sistemas hidráulicos e de motores de aeronaves, sendo um dos enfoques dado à redução de custos de manutenção e sua parcela de contribuição para os custos operacionais totais.

Similarmente, Keartland e Van Zyl (2020) utilizam ferramentas de Inteligência Artificial para o monitoramento da condição do óleo lubrificante em sistemas mecânicos. Essa análise é capaz de identificar parâmetros do fluido tais como a perda das propriedades aditivas além de níveis de contaminação, fatores primordiais para identificar precocemente falhas em máquinas. Desta forma, além de utilizar determinado componente até o máximo de sua vida útil, ao prever sua falha, também é possível substituí-lo antes que outros itens do sistema sejam afetados.

Trazendo para a realidade da gestão logística do Gripen no GLOG-AN fica evidente o quão relevante é a aplicação das ferramentas de *Machine Learning* para a redução de custos relacionados à suportabilidade da frota. Especificamente, os autores citados demonstraram os benefícios da implementação de IA para sistemas hidráulicos, motores e componentes mecânicos, áreas totalmente correlacionadas com a complexidade de uma aeronave de caça.

Khan *et al.* (2021) apontam que uma das principais despesas da logística provém da condução reativa das atividades de manutenção. A utilização de IA permite a transição de uma abordagem reativa para uma proativa definindo o momento correto para a intervenção. Essa abordagem reduz não só os custos com reparo, mas também minimiza o tempo de inatividade não planejado, contribuindo indiretamente para a otimização dos custos operacionais gerais do projeto.

Essa redução de custos ratifica a importância da aplicação da ferramenta de *Machine Learning* nas manutenções preditivas do F-39, pois resulta na melhoria da eficiência do Esquadrão de Manutenção da BAAN. Tal afirmativa vem ao encontro da concepção de eficiência, dado pela capacidade de fazer mais com menos, nesse caso, menos recursos financeiros.

3 CONCLUSÃO

A principal e mais complexa meta de qualquer GLOG é a manutenção da disponibilidade de suas frotas de aeronaves para níveis elevados. Tais índices vão ao encontro dos processos finalísticos da Força - Emprego e Preparo - contribuindo diretamente não só com a formação, manutenção e elevação de pilotos, mas também com a prontidão para o real emprego.

Motivados por essa realidade, os gestores de logística devem aprimorar constantemente seus métodos de gerenciamento da manutenção, visando à melhoria contínua e à eficiência de seus processos. Esse é o foco do Esquadrão de Manutenção da Base Aérea de Anápolis, setor responsável pela manutenção das aeronaves F-39, operadas pelo 1º GDA.

O Gripen, em fase de desenvolvimento e implantação, carece de determinados suportes logísticos, tais como a falta de instruções técnicas e de materiais de apoio à manutenção, cuja responsabilidade advém da fabricante, a SAAB. Visando mitigar essas dificuldades, que impactam diretamente na disponibilidade do projeto e nos custos de manutenção, torna-se premente a aplicação de novas metodologias para tornar as manutenções preditivas do Gripen mais precisas. Essa necessidade motivou a defesa de que a adoção de uma ferramenta de Inteligência Artificial (IA) nas manutenções preditivas do F-39 aumenta a eficiência do Esquadrão de Manutenção da Base Aérea de Anápolis.

Após a ocorrência de uma falha, quando solicitado pelo GLOG-AN, a SAAB tem demandado, em média, 8,7 dias para o envio de materiais de apoio e a emissão de ordens técnicas faltantes. O uso de inteligência artificial, especificamente de *Machine Learning*, contribui para o aumento da eficiência da manutenção, pois permite a transição de uma gestão de manutenção reativa para uma abordagem proativa. Tal abordagem, alinhada aos conceitos de manutenção preditiva, permite aos gestores antecipar as demandas de manutenção, reduzir tempos de parada e elevar a disponibilidade da frota, que se apresentou 11,63% abaixo do previsto para 2024.

De igual modo, a aplicação da referida ferramenta de IA na manutenção preditiva do F-39 apresenta-se como uma solução para a correção dos parâmetros de desgaste estabelecidos pela fabricante, considerando que o desenvolvimento e a operação da aeronave ocorrem em ambientes distintos. Tais discrepâncias, se mapeadas corretamente, garantem a otimização da vida útil dos componentes, reduzem substituições prematuras e minimizam custos totais, fatores que evidenciam a contribuição do ML na eficiência do Esquadrão de Manutenção.

Com base na análise de diversos cenários similares ao contexto da manutenção preditiva do Gripen, evidenciam-se, por meio dos bons resultados práticos, os benefícios da ferramenta apresentada neste ensaio para o melhor desempenho logístico da Base Aérea de Anápolis. Além disso, essa proposta atenderá integralmente a diretriz logística do PEMAER relativa ao aprimoramento da manutenção preditiva de equipamentos do interesse do COMAER. Dessa forma, haverá um maior número de aeronaves disponíveis na linha de voo, resultando em melhor preparação das equipagens (tripulantes) e, conseqüentemente, em maior prontidão operacional da Força, com vistas à vigilância e à defesa do espaço aéreo.

REFERÊNCIAS

- AL-KHULAQI, A.; PALANICHAMY, N.; HAW, S. C.; RAJA, S. C. Evaluating Machine Learning and Deep Learning Algorithms for Predictive Maintenance of Hydraulic System. **International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology**, Cyberjaya, v. 15, n. 1, p. 52-59, 2025. Disponível em: <https://ijaseit.insightsociety.org/index.php/ijaseit/article/download/12407/4535>. Acesso em: 25 de mar. 2025.
- BARBOSA, J. D. M. **Manutenção preditiva com recurso a Inteligência Artificial**. 2023. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/retrieve/269443/Dissertac%cc%a7a%cc%83o_JB.pdf. Acesso em: 21 mar. 2025.
- BENTALEB, A.; TOUMLAL, K.; ABOUCHABAKA, J. Predicting Aircraft Engine Failures using Artificial Intelligence. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, Kenitra, v. 15, n. 2, p. 944-949, 2024. Disponível em: https://thesai.org/Downloads/Volume15No2/Paper_95-Predicting_Aircraft_Engine_Failures_using_Artificial_Intelligence.pdf. Acesso em: 27 de mar. 2025.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria DIRMAB nº 78/PLON-2, de 05 de julho de 2017. Aprova a reedição do Manual que estabelece a doutrina, os processos e a documentação de manutenção do Sistema de Material da Aeronáutica. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 118, p. 292-775, 12 jun. 2017. Disponível em: <https://www.sislaer.fab.mil.br/terminalcendoc/Busca/Download?codigoArquivo=1766&tipoMidia=0>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria GABAER nº 1.453/GC3, de 05 de junho de 2024. Aprova a edição do Plano Estratégico Militar da Aeronáutica. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 107, p. 87-137, 10 jun. 2024. Disponível em: <https://www.sislaer.fab.mil.br/terminalcendoc/Busca/Download?codigoArquivo=37409>. Acesso em: 24 mar. 2025.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria nº 1.597/GC3, de 10 de outubro de 2018. Aprova a reedição da DCA 11-45 “Concepção Estratégica - Força Aérea 100”. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 180, p. 116-158, 15 out. 2018. Disponível em: https://www.fab.mil.br/Download/arquivos/DCA%2011-45_Concepcao_Estrategica_Forca_Aerea_100.pdf. Acesso em: 24 mar. 2025.
- KEARTLAND, S.; VAN ZYL, T. L. Automating predictive maintenance using oil analysis and machine learning. *In: 2020 INTERNATIONAL SAUPEC/ROBMECH/PRASA CONFERENCE, 2020, Cape Town. Proceedings [...]. [S. l.]: IEEE, 2020. p. 1-6.* Disponível em: https://thesai.org/Downloads/Volume15No2/Paper_95-Predicting_Aircraft_Engine_Failures_using_Artificial_Intelligence.pdf. Acesso em: 24 de mar. 2025.

KHAN, K.; SOHAIB, M.; RASHID, A.; ALI, S.; AKBAR, H.; BASIT, A.; AHMAD, T. Recent trends and challenges in predictive maintenance of aircraft's engine and hydraulic system. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [S. l.], v. 43, n. 403, p. 1-17, 2021. Disponível em:

[https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40430-021-03121-](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40430-021-03121-2.pdf?utm_source=scopus&getft_integrator=scopus)

[2.pdf?utm_source=scopus&getft_integrator=scopus](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40430-021-03121-2.pdf?utm_source=scopus&getft_integrator=scopus). Acesso em: 25 mar. 2025.

WUEST, T.; WEIMER, D.; IRGENS, C.; THOBEN, K. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. **Production & Manufacturing Research**: an open access journal, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 23-45, 2016. Disponível em:

https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/21693277.2016.1192517?src=getfr&utm_source=scopus&getft_integrator=scopus. Acesso em: 24 de mar. 2025.