



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

ALÚZIO LEYE LARANGEIRA, Cap Eng

Inteligência Artificial aplicada à Manutenção Centrada na Confiabilidade no SISCEAB

Rio de Janeiro

2025

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

ALUÍZIO LEYE LARANGEIRA, Cap Eng

Inteligência Artificial aplicada à Manutenção Centrada na Confiabilidade no SISCEAB

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 da Inteligência Artificial.
Orientadora: Caroline Pedretti Gonzaga, Maj Av

Rio de Janeiro

2025

ALUÍZIO LEYE LARANGEIRA, Cap Eng

Inteligência Artificial aplicada à Manutenção Centrada na Confiabilidade no SISCEAB

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

Aprovado por:

Presidente, André da Costa Gonçalves, Prof. Dr. - EAOAR

Caroline Pedretti Gonzaga, Maj Av - EAOAR

Rio de Janeiro

2025

RESUMO

A crescente complexidade dos sistemas críticos do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB) demanda soluções mais eficientes para a gestão da manutenção, especialmente diante do volume de dados operacionais não estruturados, armazenados em bancos de dados, como o Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviços (SILOMS). Nesse contexto, este ensaio defende o uso da Inteligência Artificial (IA) como ferramenta de apoio à Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), com foco na otimização da elaboração de boletins técnicos e na previsão de falhas em ativos eletromecânicos. A tese sustenta que a IA pode ampliar a efetividade da MCC ao organizar informações despadronizadas e ao viabilizar o monitoramento contínuo de variáveis operacionais, contribuindo para uma tomada de decisão mais ágil e fundamentada. O primeiro argumento discute como a IA aplicada ao processamento de linguagem natural pode sistematizar dados do histórico de inoperâncias, viabilizando a construção de análises como a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) com maior precisão e celeridade. O segundo explora o potencial da IA no suporte ao monitoramento em tempo real da infraestrutura crítica, fortalecendo a lógica da manutenção preditiva. As soluções propostas podem ser adaptadas a outros setores técnicos da Força Aérea Brasileira (FAB) que utilizam o SILOMS, como Radiodeterminação, Telecomunicações e Navegação e centros logísticos, promovendo decisões mais confiáveis e processos técnicos mais previsíveis. A adoção dessas soluções tecnológicas representará um avanço estratégico para a FAB, alinhando inovação digital com confiabilidade operacional.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Manutenção Centrada na Confiabilidade; *Big Data*.

1 INTRODUÇÃO

Desde 2024, o Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica do Rio de Janeiro (PAME-RJ) iniciou a implantação da Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), uma abordagem estruturada para determinar as atividades de manutenção mais eficazes e eficientes para manter a função desejada de um sistema ou equipamento em seu contexto operacional, no âmbito do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), elevando para o estado da arte o arcabouço metodológico balizador das atividades técnicas dos órgãos de manutenção.

O desenvolvimento da MCC exige o uso estruturado do histórico de inoperâncias, especialmente para determinar os principais modos de falha do equipamento alvo da análise. A obtenção dessas informações é realizada por intermédio do Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviços (SILOMS), que armazena os registros técnicos de inoperâncias e as soluções aplicadas. Trata-se de uma das fontes de consulta para determinação dos modos de falha que farão o delineamento quantitativo e qualitativo da Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA). Apesar de seu potencial de uso, a despadronização textual e o grande volume de registros dificulta sua aplicação direta à lógica da MCC, mostrando-se como um desafio à mineração e consolidação dos dados. Além disso, a operação da MCC engloba o conceito de manutenção preditiva, baseado na leitura constante de dados dos mais diversos sensores de equipamentos, para identificar tendências de falhas antes que ocorram.

Nesse cenário, a Subdivisão de Eletromecânica do PAME-RJ destaca-se como precursora na missão de revisar os Boletins Técnicos (BT) dos ativos de energia e climatização da infraestrutura crítica do SISCEAB, tais como Fontes de Alimentação Ininterrupta (UPS), Grupos Geradores (GRUGER), *Chillers* e Bancos de Baterias. Eles garantem a operação contínua e confiável de Radares, Sistemas de Telecomunicação, Auxílios à Navegação Aérea e Casas de Força dos Órgãos Regionais que realizam o controle do tráfego aéreo militar e civil. Complementando essa estrutura, o Centro de Gerenciamento Técnico (CGTEC) — divisão do próprio PAME-RJ — é responsável pelo monitoramento contínuo de um elevado volume de sensores associados a esses equipamentos, consolidando dados operacionais essenciais para decisões.

Diante dessa problemática, torna-se imperativo considerar o uso de tecnologias fronteiriças como solução para o conflito entre o novo paradigma de manutenção e a necessidade de extrair valor de um grande volume de informações.

Assim, este ensaio defende a utilização de Inteligência Artificial como ferramenta para otimizar a operacionalização da MCC no SISCEAB. A proposta não pretende substituir os

métodos tradicionais da engenharia de confiabilidade, mas sim integrar soluções tecnológicas capazes de ampliar a capacidade de análise sobre o histórico operacional já disponível.

Argumenta-se, então, que o uso da IA na análise de dados com despadronizações promove agilidade e precisão na categorização das informações que sustentam a implantação da MCC e, em segundo lugar, que sua integração aos sistemas de monitoramento do Sistema de Gerenciamento Técnico (SIGTEC) potencializa a aplicação da manutenção preditiva, ao identificar padrões e tendências emergentes.

A proposta é dirigida aos profissionais envolvidos nos grupos de trabalho destinados a atuarem na transição do modelo atual de manutenção para a abordagem baseada na confiabilidade. Trata-se de uma proposta inovadora e sem precedentes no recorte apresentado. A metodologia empregada poderá, inclusive, expandir-se para outros setores bem como para atividades que demandem análise, síntese e monitoramento de um elevado volume de informações, com uso de linguagem natural e arcabouço teórico atrelado.

2 APLICAÇÕES DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA SISTEMATIZAÇÃO E PREDIÇÃO PARA A MCC NO SISCEAB

Apesar do termo “IA” estar difundido no senso comum como sendo uma única entidade, o termo abrange, na realidade, um vasto leque de soluções tecnológicas com aplicações diversas, incluindo o processamento de linguagem natural para reconhecimento de padrões, a análise preditiva de séries temporais e algoritmos de otimização. As habilidades de generalização e aprendizado (supervisionado ou não) são elementos desejados na aplicação da situação-problema (Campos, 2020). O *Big Data* de histórico de manutenção gerado pelo SILOMS, bem como a elevada quantidade de variáveis de ativos monitorados pelo Centro de Gerenciamento Técnico do PAME-RJ (Marinho, 2025), representam um desafio à operacionalização da MCC. As características de generalização e aprendizado da IA se mostram como oportunidades para garantir maior eficiência no processo.

Essas capacidades fundamentam os dois aspectos a serem abordados a seguir: o primeiro trata do uso da IA na organização de dados despadronizados, com foco na elaboração do FMEA como etapa essencial da MCC; o segundo discute sua aplicação na manutenção preditiva, a partir da análise de variáveis operacionais monitoradas, contribuindo para decisões mais precisas na gestão de ativos críticos.

2.1 IA COMO APOIO NA ELABORAÇÃO DE BOLETINS TÉCNICOS DA MCC

A elaboração da documentação da MCC requer um trabalho laborioso, com o envolvimento de diversos profissionais experientes em áreas distintas e complementares (Filz; Langner; Herrmann; Thiede, 2021), muitas vezes alocados em localidades distantes. Isso implica a criação de Grupos de Trabalho para construção dos boletins, custos com diárias e passagens, além de significativo tempo dedicado ao processamento manual das tabelas extraídas do SILOMS (Brasil, 2024).

A Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA, na sigla em inglês) é uma ferramenta estruturada que busca identificar e priorizar falhas potenciais em sistemas ou processos. Seu funcionamento parte de uma sessão sistemática de análise técnica, na qual se levantam possíveis modos de falha e seus impactos operacionais. Em seguida, cada falha identificada é avaliada com base em três critérios: a frequência com que pode ocorrer (O), a gravidade de seus efeitos (S) e a dificuldade de detecção antes que se manifeste (D). Esses fatores são quantificados de 1 a 10 e multiplicados entre si, gerando um índice de prioridade de risco (*Risk Priority Number* – RPN), que orienta a alocação dos recursos de manutenção (Puente, 2014).

A pesquisa de Alexandria, Almeida e Scanfone (2025) sobre a aplicação da MCC aos BT de grupos geradores do SISCEAB demonstra a complexidade do processo de elaborar o FMEA: coletar e analisar dados históricos de falhas, além de discutir tecnicamente com mantenedores e operadores para identificar as funções dos equipamentos, suas falhas funcionais e consequências. Essa abordagem, embora essencial para garantir a confiabilidade de sistemas críticos, demanda um investimento expressivo de tempo e recursos humanos — o que se evidencia no próprio estudo, que extraiu inicialmente 23.575 registros do SILOMS, dos quais apenas 518 foram considerados válidos após filtragem, remoção de duplicatas e classificação técnica. Esse recorte quantitativo reforça a relevância de soluções automatizadas para o pré-processamento dos dados.

Nesta etapa, emerge a possibilidade do uso da IA como ferramenta acessória para otimização. Para que os registros do SILOMS possam subsidiar a MCC, é necessário submetê-los a uma etapa prévia de organização, o que pode ser realizado com apoio de linguagens de programação, como Python, associadas a técnicas de IA adequadas. Com bibliotecas como Pandas e spaCy, os dados são importados, tratados para remoção de duplicatas e registros irrelevantes. São então padronizados com ferramentas de Processamento de Linguagem Natural (NLP), como Word2Vec ou BERT, que identificam padrões linguísticos e agrupam descrições semelhantes (Hu; Xiong; Zhang, 2024).

Hu, Xiong e Zhang (2024) propõem um modelo neural em duas etapas, com mecanismos de atenção, para tratar registros de falhas textuais não estruturados, tais como os do SILOMS. A primeira etapa gera uma representação semântica precisa; a segunda compara padrões históricos para classificar automaticamente os eventos. Essa abordagem se mostra eficaz para lidar com entradas despadronizadas, com terminologia variada, reduzindo o esforço manual e permitindo a categorização contextual das falhas. O resultado é uma base de dados padronizada e parametrizada, e por isso precisa e confiável para uso nas ferramentas da MCC, como o FMEA.

Entre as abordagens de IA aplicadas à FMEA, destacam-se os sistemas baseados em regras *fuzzy*, por sua capacidade de lidar com dados imprecisos ou subjetivos. No contexto do SILOMS, cujos registros de inoperâncias muitas vezes são textuais, não padronizados e descritos com variações terminológicas entre localidades, a lógica *fuzzy* também pode ser empregada para traduzir essas descrições qualitativas em escalas linguísticas padronizadas — por exemplo, graus de severidade, frequência ou detectabilidade. Termos como “falha recorrente”, “paralisa o sistema” ou “difícil de detectar” — frequentemente usados nos relatos dos técnicos — podem ser associados a categorias fuzzy como alta frequência, alta severidade ou baixa detectabilidade. Cada termo é convertido em um valor numérico dentro de uma escala, utilizando funções de pertinência, o que permite alimentar a matriz FMEA com dados consistentes, mesmo a partir de entradas subjetivas. De posse dessas classificações, os modos de falha podem ser priorizados de forma automatizada, subsidiando tecnicamente a elaboração dos boletins técnicos conforme os princípios da MCC (Puente *et al.*, 2014).

A aplicação de modelos preditivos baseados em dados históricos e operacionais permite estimar com elevada precisão a probabilidade de falha de componentes, automatizando parte da análise FMEA e reduzindo a subjetividade no processo decisório. Essa abordagem, denominada FMEA orientada por dados, integra algoritmos de aprendizado profundo e técnicas clássicas de machine learning, como Redes Neurais Artificiais (ANN), *Random Forest* e Árvores de Decisão. Os modelos são treinados a partir de variáveis operacionais como tempo de uso, carga, intervenções passadas e temperatura, extraídas de registros técnicos extensos. Por meio da seleção direcionada das variáveis mais relevantes para cada modo de falha e da identificação de padrões sutis de degradação — com destaque para o uso de redes neurais artificiais (ANN), da mesma classe de modelos que sustentam tecnologias como o ChatGPT — os experimentos alcançaram acurácia próxima a 95% na previsão de falhas. Isso evidencia não apenas a robustez técnica dos modelos, mas a vantagem em aplicá-los ao SISCEAB (Filz *et al.*, 2021).

Esses resultados reforçam o argumento de que a Inteligência Artificial, ao automatizar a interpretação de grandes volumes de dados operacionais e reduzir a subjetividade técnica, contribui diretamente para a implementação da MCC no SISCEAB, ao qualificar a categorização e a priorização das falhas com base em critérios consistentes e reproduzíveis.

2.2 PREDIÇÃO DE FALHAS COM APOIO DA IA

A implantação do Centro de Gerenciamento Técnico (CGTEC) do SISCEAB, conforme diretrizes da DCA 21-2/2019, representa uma mudança no modelo de manutenção adotado pelo Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro. Criado com o objetivo de promover o incremento da disponibilidade, confiabilidade e integridade dos serviços prestados, o CGTEC opera por meio do SIGTEC, uma estrutura de software que consolida dados operacionais e de falhas dos ativos do SISCEAB em tempo real. Parte da proposta dessa centralização reside na capacidade de monitoramento contínuo dos ativos operacionais, mitigando riscos de falhas críticas, aumentando a pronta-resposta, otimizando recursos logísticos e humanos na tomada de decisão. O SIGTEC, como ferramenta estratégica, viabiliza a supervisão técnica integrada e o mapeamento dos sistemas, incluindo-se aqui os ativos de energia e climatização (Brasil, 2019).

Atualmente, a política de manutenção adotada no SISCEAB tem sido fundamentada no modelo de manutenções preventivas e corretivas apenas. A inclusão da MCC insere uma nova estratégia: a manutenção preditiva. Essa modalidade, acrescida às anteriores, compõe um modelo mais eficiente, no qual a escolha do tipo de manutenção e seu intervalo de aplicação deve considerar a taxa de falha dos ativos e os custos globais decorrentes das falhas ocorridas (Farrero; Tarrés; Losilla, 2002).

A integração da Inteligência Artificial nesse ecossistema tem o potencial de transformar o monitoramento contínuo realizado pelo SIGTEC em uma poderosa ferramenta de manutenção preditiva. Segundo Barbosa (2023), a IA permite a implementação de sistemas que, baseados em dados de sensores, são capazes de prever falhas em equipamentos industriais, reduzindo paradas não planejadas e os custos associados à manutenção corretiva. Nesse sentido, a manutenção preditiva, definida como um modelo fundamentado em padrões emergentes e no acompanhamento sistemático do desempenho de máquinas e processos, pode ser significativamente aprimorada pela aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina.

Esses algoritmos analisam continuamente grandes volumes de dados operacionais, como destaca Zancan, Passador e Passador (2023), possibilitando decisões mais rápidas e eficazes, ao identificar tendências de falha antes que estas se concretizem.

Ao incorporar essas ferramentas ao SIGTEC, o CGTEC não apenas eleva a precisão das análises técnicas, como também amplia sua capacidade de antecipação e resposta, viabilizando uma gestão mais proativa e eficiente da infraestrutura crítica sob sua responsabilidade (Saran; Saran; Franzotti, 2024).

Com a integração da manutenção preditiva ao SIGTEC, aliada à IA, consolida-se uma estratégia mais eficiente na gestão de ativos, capaz de reduzir custos, orientar melhor os recursos e aumentar a confiabilidade. Trata-se de um avanço alinhado à lógica da MCC, que fortalece a capacidade de antecipação e resposta do SISCEAB frente às falhas operacionais.

3 CONCLUSÃO

A aplicação da Inteligência Artificial à lógica da Manutenção Centrada na Confiabilidade revela-se uma alternativa promissora para superar desafios técnicos e operacionais no âmbito do SISCEAB, notadamente os problemas em sistematizar registros despadronizados e operacionalizar a manutenção preditiva com base em grandes volumes de dados. Ao automatizar a estruturação de dados textuais extraídos de bancos como o SILOMS, a IA viabiliza análises mais precisas e padronizadas, facilitando a elaboração de ferramentas da MCC, como o FMEA, essenciais à categorização e priorização de falhas. Com isso, a elaboração dos boletins técnicos torna-se mais objetiva, alinhada às exigências da MCC e menos dependente de esforços manuais.

No mesmo sentido, a incorporação de técnicas de aprendizado de máquina aos sistemas de monitoramento operacional permite transformar dados em tempo real em insumos estratégicos para a predição de falhas. Essa capacidade amplia a eficiência da manutenção preditiva no SISCEAB, promovendo a antecipação de riscos e o uso mais racional dos recursos disponíveis. As evidências analisadas apontam que essa abordagem técnica fortalece os pilares da confiabilidade e da disponibilidade, objetivos centrais da MCC.

As soluções discutidas neste ensaio podem ser adaptadas, a outros setores técnicos que compartilhem da mesma sistemática de uso do SILOMS, como as Radiodeterminação, Telecomunicações e Auxílios à Navegação, que enfrentam desafios similares. Em escala ainda mais ampla, essas aplicações podem se estender a outras atividades ou unidades do COMAER, especialmente aquelas que lidam com grandes volumes de dados ou respostas rápidas a eventos críticos, como organizações logísticas e centros de manutenção. Nesse conjunto ampliado, a IA se apresenta como uma aliada estratégica para qualificar decisões e aprimorar os processos técnicos de maneira estruturada e previsível.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, J. D. M. **Manutenção preditiva com recurso a Inteligência Artificial**. 2023. Dissertação de Mestrado Integrado (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/retrieve/269443/Dissertac%CC%A7a%CC%83o_JB.pdf. Acesso em: 11 abr. 2025.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. Portaria DECEA nº 241, de 19 de dezembro de 2019. Aprova a reedição da Diretriz para a Implantação do Centro de Gerenciamento Técnico do SISCEAB. (DCA 21-2/2019). **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Rio de Janeiro, n. 1, p. 69, 2 jan. 2020. fl. 69. Disponível em: http://www.cendoc.intraer/sisbca/bca_pdf/2020/bca_1_02-01-2020.pdf. Acesso em: 6 abr. 2025.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Revisão do BT de Manutenções Preventivas do SIGE**, Rio de Janeiro, 22 out. 2024. Disponível em: https://adoc.fab.mil.br/servir_pdf//var/adoc/files/2024/10/2H4VZA7YMF7VGAON5RZHZA4LFW4GWIMVI.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.
- CAMPOS, R. S. Desmistificando a inteligência artificial: uma breve introdução conceitual ao aprendizado de máquina. **Aoristo-International Journal of Phenomenology, Hermeneutics and Metaphysics**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 106-123, 2020. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/aoristo/article/view/24880>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- FARRERO, J. C.; TARRÉS, L. G.; LOSILLA, C. B. Optimization of replacement stocks using a maintenance programme derived from reliability studies of production systems. **Industrial Management & Data Systems**, [S. l.], v. 102, n. 4, p. 188-196, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/02635570210423226>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- FILZ, M.; LANGNER, J. E. B.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Data-driven failure mode and effect analysis (FMEA) to enhance maintenance planning. **Computers in Industry**, [S. l.], v. 129, p. 103451, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103451>. Acesso em: 6 abr. 2025.

HU, Z.; XIONG, H.; ZHANG, X. Two-stage attention network for fault diagnosis and retrieval of fault logs. **Expert Systems With Applications**, [S. l.], v. 249, 123365, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123365>. Acesso em: 6 abr. 2025.

MARINHO, Daniel. **CGTEC: a espinha dorsal do monitoramento técnico do controle aéreo brasileiro**. PAME-RJ, Rio de Janeiro, 24 fev. 2025. Disponível em: <https://pame.decea.mil.br/cgtec-a-espinha-dorsal-do-monitoramento-tecnico-do-controle-aereo-brasileiro/>. Acesso em: 6 abr. 2025.

PUENTE, J.; PRIORE, P.; FERNÁNDEZ, I.; GARCÍA, N.; DE LA FUENTE, D.; PINO, R. On improving failure mode and effects analysis (FMEA) from different artificial intelligence approaches. In: Proceedings on the International Conference on Artificial Intelligence (ICAI). **The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp)**, p. 1, 2014. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/46550c3c440c9f3e89d9489018edb204a05ab710>. Acesso em: 6 abr. 2025.

SARAN, D. J.; BRUSTELLO SARAN, M. C.; FRANZOTTI, C. L. O IMPACTO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL: benefícios, desafios e tendências. **SITEFA**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. e7114, 2024. Disponível em: <https://publicacoes.fatecsertaozinho.edu.br/sitefa/article/view/304>. Acesso em: 22 abr. 2025.

ZANCAN, C.; PASSADOR, J. L.; PASSADOR, C. S. Modelos De Inteligência Artificial Na Gestão De Consórcios Intermunicipais Brasileiros. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, Novo Hamburgo, v. 20, n. 2, p. 80-123, 2023. Disponível em: <https://periodicos.feevale.br/seer/index.php/revistagestaoedesenvolvimento/article/view/3424/3230>. Acesso em: 11 abr. 2025.