

**ESTUDO DE CASO AF447 – USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA
PREDIÇÃO DE CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS ADVERSAS EM VOO****William de Carvalho Xavier¹
Pedro Henrique Luiz de Souza²****RESUMO**

O presente trabalho possui o objetivo de analisar o potencial da aplicação de Inteligência Artificial (IA) na previsão de condições meteorológicas críticas durante o voo. Para isso, toma-se como referência o acidente do voo Air France 447 (AF447). O problema central investigado consiste em compreender como a IA pode auxiliar na identificação e na mitigação dos riscos atmosféricos análogos aos enfrentados pela aeronave, principalmente os relacionados à formação de gelo em altitudes elevadas e à ausência de alertas antecipados. O objetivo, portanto, é revisitar o acidente sob a perspectiva dos modelos preditivos baseados em inteligência artificial, avaliando como eles poderiam prever e sinalizar as condições meteorológicas adversas. A pesquisa adota o método de estudo de caso, fundamentado na análise documental de relatórios oficiais do BEA e do CENIPA. Para sustentar teoricamente a discussão, emprega-se a revisão bibliográfica sobre o uso de IA na meteorologia aeronáutica e em simulações exploratórias aplicadas a cenários meteorológicos semelhantes ao do AF447. Os resultados indicam que modelos de IA, ao processarem dados meteorológicos em tempo real, poderiam antecipar formações perigosas com mais precisão e antecedência em comparação aos sistemas disponíveis à época, permitindo uma resposta operacional mais efetiva. Conclui-se que a integração de IA a sistemas de apoio à decisão a bordo tem potencial para ampliar a segurança operacional em rotas sujeitas a fenômenos severos, como os da Zona de Convergência Intertropical. Sugere-se, por fim, o desenvolvimento de protocolos de integração entre IA, sistemas embarcados e centros de controle para otimizar a resposta a ameaças meteorológicas.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Previsão; Meteorologia aeronáutica; Segurança operacional; AF447.

¹ Especialista em Docência Universitária pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Graduado em Internet e Redes de Computadores pela Universo. Professor da Escola Politécnica e de Artes no R. bras. Av. civil. ci. Aeron., Florianópolis, v. 5, n. 5, p. 106-126, out/dez. 2025.

curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Treinamento em CRM e alta performance pela FCT. Piloto de Linha Aérea – Avião. E-mail: william.xavier1@gmail.com

² Graduando em Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás. INVA. E-mail: pedrohenriquejp50@gmail.com

CASE STUDY AF447 – USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR PREDICTING ADVERSE WEATHER CONDITIONS IN FLIGHT

ABSTRACT

The present study aims to analyze the potential of applying artificial intelligence (AI) to the prediction of critical in-flight meteorological conditions, using the Air France Flight 447 (AF447) accident as a reference point. The central issue investigated is understanding how AI can assist in identifying and mitigating atmospheric risks similar to those encountered by the aircraft, particularly related to high-altitude ice formation and the absence of early alerts. The objective is to revisit the accident through the lens of AI-based predictive models, assessing how such systems could have anticipated and signaled the adverse meteorological conditions. The research adopts a case study method grounded in documentary analysis of official reports from BEA and CENIPA. To support the discussion theoretically, it employs a literature review on the use of AI in aeronautical meteorology and exploratory simulations applied to meteorological scenarios similar to that of AF447. The results indicate that AI models, by processing real-time meteorological data, could have forecast hazardous formations with greater accuracy and earlier than the systems available at the time, enabling a more effective operational response. The study concludes that integrating AI into onboard decision-support systems has the potential to enhance operational safety on routes subject to severe weather phenomena, such as those found in the Intertropical Convergence Zone. Finally, it suggests the development of integration protocols between AI, onboard systems, and control centers to optimize responses to meteorological threats.

Keywords: Artificial intelligence; Weather forecasting; Aeronautical meteorology; Operational safety; AF447.

1 INTRODUÇÃO

O acidente com o voo Air France 447, em 1º de junho de 2009, constitui um dos episódios mais emblemáticos e trágicos da história da aviação comercial moderna, servindo como um marco para a revisão de paradigmas de segurança

operacional. A queda do Airbus A330-203, que operava a rota Rio de Janeiro - Paris com 228 pessoas a bordo, no Oceano Atlântico, expôs de forma crua as vulnerabilidades de um sistema aeronáutico altamente tecnológico quando confrontado com fenômenos meteorológicos complexos. Esse evento não apenas resultou na perda de vidas, mas também acionou uma profunda reavaliação global sobre a interdependência entre fatores humanos, tecnológicos e ambientais, destacando a necessidade premente de evolução de abordagens reativas para sistemas de gestão de risco verdadeiramente preditivos no contexto das operações de voo.

O problema central identificado na tragédia do AF447 reside nas limitações intrínsecas dos sistemas meteorológicos e de alerta disponíveis à época, que se mostraram insuficientes para antecipar e mitigar um cenário de risco conhecido. A aeronave ingressou em uma região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) caracterizada por intensa atividade convectiva e formação de cristais de gelo em alta altitude. A obstrução dos sensores de velocidade (Tubos de Pitot) por estes cristais, um fenômeno previsível para a rota, desencadeou uma cascata de falhas que culminou na perda de controle. A tripulação, por sua vez, foi sobrecarregada por alarmes contraditórios e se viu desprovida de informações preditivas claras que permitissem um diagnóstico situacional preciso e ações mitigadoras efetivas, situação que revelou uma lacuna crítica entre a capacidade de detecção de falhas e a de previsão proativa de ameaças.

Em face desse contexto, o presente artigo tem como objetivo geral analisar o acidente do voo AF447 sob a ótica da aplicação de sistemas de Inteligência Artificial (IA) preditiva para a identificação e o alerta antecipado de condições meteorológicas adversas em voo. Para a consecução desse fim, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos: revisar os fatores técnicos e meteorológicos que contribuíram para o acidente, com base nos relatórios oficiais de investigação, e investigar as aplicações atuais de Inteligência Artificial (IA) e aprendizado de máquina na previsão meteorológica aeronáutica, analisando seu potencial uso em sistemas de bordo para antecipar condições críticas, como a formação de gelo.

Quanto aos procedimentos metodológicos, adota-se uma abordagem de natureza mista, qualitativa-quantitativa, com caráter exploratório-descritivo. A investigação está fundamentada em pesquisa documental, com análise crítica do

relatório final do *Bureau d'Enquêtes et d'Analyses* (BEA) e de outras fontes técnicas, além de apoiar-se em revisão bibliográfica sistemática da literatura especializada em IA e meteorologia aeronáutica.

A estrutura do texto está organizada em seis seções, incluindo esta introdução. Na sequência, apresenta-se a revisão teórica, subdividida na análise do acidente AF447, nas limitações da meteorologia aeronáutica convencional e no potencial da IA aplicada à previsão e aos sistemas de apoio à decisão. Na seção de procedimentos metodológicos, detalha-se o desenho da pesquisa. Os resultados discorrem sobre a análise meteorológica do voo e as simulações com IA, enquanto a discussão analisa criticamente os achados, suas implicações e limitações. Por fim, as considerações finais sintetizam as conclusões e sugerem direções para pesquisas futuras.

A hipótese central que norteia este trabalho sustenta que a aplicação de sistemas de Inteligência Artificial preditiva capazes de processar dados meteorológicos em tempo real e de aeronave pode contribuir significativamente para a prevenção ou mitigação dos fatores semelhantes aos que levaram ao acidente do AF447. Especificamente, postula-se que a geração de alertas antecipados e precisos sobre o risco de formação de gelo teria permitido à tripulação adotar ações evasivas ou preparar os sistemas da aeronave de forma proativa, possivelmente quebrando a sequência de eventos que resultou na perda de controle, reforçando, assim, o papel transformador da IA na aviação do futuro.

2 REVISÃO TEÓRICA

O acidente com o voo Air France 447, ocorrido em 1º de junho de 2009, é um divisor de águas nos estudos de segurança operacional, servindo como um estudo de caso emblemático sobre as limitações de sistemas de monitoramento reativos frente a fenômenos meteorológicos complexos.

2.1 ACIDENTE AF447: CONTEXTO E FATORES CONTRIBUINTE

A aeronave Airbus A330-203, que cumpria a rota Rio de Janeiro - Paris com 228 pessoas a bordo, teve sua trajetória tragicamente interrompida sobre o Oceano

Atlântico. O evento não apenas expôs uma falha de equipamento, mas a vulnerabilidade de todo um sistema sociotécnico que dependia de informações precisas para operar com segurança. A análise desse acidente é, portanto, expressivo para justificar a transição de uma filosofia de segurança reativa para uma abordagem preditiva (BEA, 2012).

O catalisador da tragédia foram as condições atmosféricas severas na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), um ambiente propício à formação de cristais de gelo em altas altitudes. A investigação do *Bureau d'Enquêtes et d'Analyses* (BEA) confirmou que a obstrução dos três sensores de velocidade (tubos de Pitot) por esses cristais foi o evento técnico inicial. Essa falha de instrumentação representa um ponto crítico: um sistema de proteção que não foi capaz de antecipar ou mesmo de resistir a uma condição atmosférica conhecida e estatisticamente previsível para aquela rota. A perda de dados de velocidade confiáveis corrompeu a base sobre a qual toda a automação da aeronave operava, demonstrando a fragilidade de um sistema que aguarda a ocorrência do problema para então reagir (BEA, 2012).

As conclusões do BEA apontam que, após a falha dos sensores e a consequente desconexão do piloto automático, a tripulação não conseguiu diagnosticar corretamente o problema, levando a aeronave a um estol não recuperado. Essa falha humana, contudo, está intrinsecamente ligada à falha tecnológica. A falta de um sistema de prevenção robusto e, principalmente, preditivo, não só permitiu que a formação de gelo incapacitasse os sensores, mas também gerou um cenário de caos informacional na cabine, com alarmes contraditórios que sobrecarregaram a capacidade cognitiva dos pilotos. O acidente, portanto, evidencia que a ausência de um sistema capaz de prever o risco iminente e fornecer alertas claros e antecipados foi um fator contribuinte decisivo para o desfecho catastrófico (BEA, 2012).

2.2 METEOROLOGIA AERONÁUTICA E LIMITAÇÕES ATUAIS

A meteorologia aeronáutica ocupa um papel essencial na segurança operacional, pois fornece as informações atmosféricas que orientam tanto o planejamento quanto a execução do voo. Variáveis como: temperatura, pressão, umidade, vento e desenvolvimento das nuvens afetam diretamente o desempenho

das aeronaves, influenciando gradiente de subida, consumo de combustível, escolha de altitudes e a própria estratégia de navegação utilizada pela tripulação. Em um ambiente dinâmico como a atmosfera, compreender essas variáveis e antecipar sua evolução é fundamental para reduzir riscos e garantir margens adequadas de segurança (Gultepe *et al.*, 2019).

Isso porque diversos fenômenos meteorológicos representam ameaças diretas ao voo e exigem vigilância constante por parte das tripulações. Entre os mais relevantes estão turbulência em ar claro, cisalhamento do vento, tempestades convectivas, *microburst*¹, granizo, gelo em altitude, nevoeiro e baixa visibilidade. Cada um desses eventos pode afetar de maneira distinta o envelope de voo, alterando a sustentação, a eficiência dos controles, o desempenho dos motores e a estabilidade da aeronave. Em um contexto operacional, tais fenômenos impõem desafios adicionais ao processo decisório, sobretudo em situações em que o tempo de resposta é limitado (Gultepe *et al.*, 2019).

Ainda segundo os autores, para mitigar os riscos associados aos fenômenos atmosféricos, a aviação utiliza diferentes fontes de informação meteorológica baseadas em modelos numéricos, dados de satélite, radares e medições provenientes das próprias aeronaves em operação. Esses sistemas permitem identificar tendências de formação de nuvens, variações de vento, instabilidade atmosférica e condições que podem comprometer o desempenho do voo.

Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos das últimas décadas, ainda existem limitações importantes. Tempestades convectivas podem se intensificar rapidamente, células de gelo em altitude podem surgir em intervalos muito curtos e regiões oceânicas continuam apresentando baixa densidade de sensores, resultando em lacunas significativas na previsão. Essa combinação de fatores reduz a capacidade de antecipação dos modelos e cria cenários onde a tripulação é exposta a condições adversas com pouca margem de reação (Gultepe *et al.*, 2019).

Dentro desse contexto, o gelo em voo se destaca como um dos fenômenos meteorológicos mais críticos, principalmente devido ao seu impacto imediato no desempenho aerodinâmico e na estabilidade da aeronave. Sua formação é difícil de ser prevista, sua detecção em tempo real é limitada e muitos sistemas embarcados ainda dependem de respostas reativas, atuando apenas após o acúmulo de gelo já

¹ Rajada descendente.

ter iniciado. Por isso, compreender a dinâmica desse fenômeno, suas particularidades e as restrições dos sistemas de proteção convencionais tornam-se fundamental (Gultepe *et al.*, 2019). Esse aspecto se torna ainda mais evidente em acidentes como o do AF447, onde a combinação de gelo em altitude, variabilidade atmosférica e a ausência de previsões mais precisas, contribuiu para um cenário operacional extremamente desafiador.

A complexidade do gelo em voo e seus impactos diretos na segurança operacional evidenciam a necessidade de estratégias eficazes de proteção capazes de mitigar esse risco de forma confiável. Diante das limitações na previsão e na detecção do fenômeno, conforme mencionado, a indústria aeronáutica passou a investir no desenvolvimento de tecnologias específicas antigelo e de degelo embarcadas nas aeronaves com vistas a evitar ou reduzir o acúmulo de gelo ainda nas fases iniciais de formação, evolução essa essencial para complementar o trabalho das tripulações e ampliar as margens de segurança.

Os sistemas de proteção contra gelo iniciou-se na Segunda Guerra Mundial com o desenvolvimento dos primeiros sistemas de degelo pneumático, que utilizavam inflação mecânica para rachar o gelo acumulado nas bordas de ataque (Jackson, 2007). Desde então, muitos outros sistemas foram desenvolvidos.

As aeronaves modernas utilizam uma variedade de sistemas de degelo e antigelo com vistas a manter a segurança em condições de formação de gelo, sendo os mais comuns o sistema pneumático, o aquecimento por ar sangrado, os aquecedores eletrotérmicos e os sistemas de fluido químico.

No sistema pneumático, consolidado desde meados do século XX e ainda recomendado em aeronaves turboélice, como as da família ATR, composto por membranas de borracha (*deicing boots*²) nos bordos de ataque das asas e superfícies estabilizadoras são infladas para quebrar o gelo acumulado, usando ar comprimido para expandir e depois um vácuo para retrain, conforme descrito por manuais aeronáuticos (EASA, 2020). Já o método de aquecimento por sangria de ar (*bleed-air*), amplamente empregado em jatos, como Boeing 737 e Airbus A320, utiliza ar quente sangrado do compressor do motor para aquecer bordas de ataque das asas e outras superfícies, prevenindo a adesão do gelo (*anti-ice*) (FAA, 2022).

² Botas pneumáticas.

Os sistemas eletrotérmicos, por sua vez, empregam resistências elétricas instaladas em superfícies críticas como para-brisas, tubos Pitot ou hélices: ao serem ativados fornecem calor para derreter ou prevenir a formação de gelo (Florida Flyers, s.d.; Boeing, 2021).

Por fim, há o sistema químico conhecido como TKS (*Tecalemit-Kilfrost-Sheepbridge Stokes*³) *weeping-wing*⁴, que exsuda um fluido anticongelante composto por etileno glicol por meio de painéis de titânio perfurados nas bordas de ataque das asas e estabilizadores; esse fluido forma uma película protetora que reduz a aderência do gelo, proporcionando proteção contínua durante o voo (Cleveland; Stone, 2019; Thomas; Cassoni; Macarthur, 1996).

Outra tecnologia em desenvolvimento é um sistema eletrotérmico baseado em nanotubos de carbono (CNT) testado pela Embraer em parceria com a Collins Aerospace, que apresenta menor consumo energético e menor peso em relação aos sistemas convencionais (Embraer; Collins, 2022). Todos esses sistemas atualmente utilizados, como aquecedores pneumáticos ou elétricos, são, em grande parte, ativados após a detecção de gelo por sensores, o que implica uma resposta reativa e não preventiva. Essa abordagem reativa pode ser inadequada em situações de formação rápida de gelo, para a qual a resposta imediata é essencial para garantir a segurança do voo. Além disso, esses sistemas podem aumentar o consumo de energia e reduzir a eficiência operacional da aeronave (AOPA, 2022).

A relevância operacional e a limitação dessa metodologia são corroboradas por eventos recentes, como o acidente com o ATR-72 em Vinhedo, ocorrido em 2024 com um voo da Voepass, no qual a aeronave permaneceu por alguns minutos em zona crítica de formação de gelo (CENIPA, 2024). Essa dependência de detecção pós-formação pode gerar latências críticas entre a identificação da condição e a atuação completa do sistema. Em particular, sistemas pneumáticos e elétricos possuem tempos de ativação que variam conforme o modelo e o tipo de aeronave, podendo resultar em alguns segundos de atraso até que a superfície esteja efetivamente protegida.

Embora documentos regulatórios, como o *Advisory Circular 20-73A* da FAA, descrevam procedimentos e parâmetros gerais de certificação, não há valores

³Termos relacionados às empresas Tecalemit, Kilfrost e Sheepbridge Stokes, que criaram o sistema.

⁴Asa de exsudação.

únicos padronizados de espessura mínima de gelo ou de tempo de resposta aplicáveis a todas as aeronaves, sendo esses parâmetros definidos caso a caso pelos fabricantes e autoridades certificadoras (FAA, 2020).

Assim, os atrasos na ativação dos sistemas de proteção contra gelo podem permitir a progressão do acúmulo nas superfícies aerodinâmicas, especialmente em condições de gotas super-resfriadas (*Supercooled Large Droplets*), que favorecem a formação rápida de gelo fora dos limites de certificação convencionais. Esse acúmulo altera o perfil aerodinâmico das asas, reduz o coeficiente de sustentação e aumenta a velocidade de estol, comprometendo o desempenho e o controle da aeronave (Politovich, 2009).

Assim, pode-se afirmar que os sistemas convencionais de proteção contra gelo apresentam limitações operacionais relevantes, sendo baseados em sensores físicos, lógicas determinísticas e acionamento manual ou automático convencional. Estudos realizados nos últimos três anos – que serão examinados mais adiante – apontam para outras inovações mais tecnológicas, em fase experimental, como o sistema inovador de detecção de gelo aprimorado por IA preditiva utilizando sensores de grafeno para aumentar a segurança e a eficiência na aviação, desenvolvido por Farina *et al.*, (2024), e o sistema para suporte inteligente à decisão de degelo de aeronaves baseado em análise de imagens em tempo real, projetado por Korga (2025), com potencial de implementação.

2.3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA À PREVISÃO METEOROLÓGICA

A IA, em especial os modelos de aprendizado de máquina, tem se consolidado, de acordo com Kim *et al.*, (2021), como uma ferramenta preditiva essencial em setores que exigem elevado grau de precisão e confiabilidade operacional em diversas áreas. Em complemento, de acordo com Goodfellow, Bengio e Courville (2016), algoritmos de *deep learning*⁵ são capazes de identificar padrões complexos em grandes volumes de dados. Esses algoritmos são

⁵*Deep learning* é um subcampo de pesquisa em aprendizado de máquina (ML). Ele é composto por múltiplas camadas ocultas de redes neurais artificiais. A metodologia de deep learning aplica transformações não lineares e abstrações de alto nível a grandes conjuntos de dados, a fim de extrair automaticamente padrões complexos (Vargas, Mosavi, Ruiz, 2017).

particularmente adequados para a previsão de fenômenos atmosféricos de rápida evolução, como a formação de gelo em voo (Korga, 2025).

Dentre os modelos de maior relevância, Farina *et al.*, (2024) destacam o de Regressão Logística, o *Random Forests*⁶, as Máquinas de Vetores de Suporte (SVMs) e as Redes Neurais Artificiais (ANNs), que apresentam excelente desempenho em tarefas de classificação binária e regressão, o que os torna adequados para essa aplicação.

Ainda segundo os autores, modelos especializados em dados sequenciais também se mostram relevantes: as Redes Neurais Recorrentes (RNNs), que mantêm estados ocultos ao longo do tempo, são úteis para processar informações temporais, enquanto as *Long Short-Term Memory*⁷ (LSTM), uma forma avançada de RNN, incorporam células de memória capazes de aprender dependências de longo prazo, aprimorando ainda mais a capacidade dos sistemas de identificar padrões temporais associados à formação de gelo. Eles acrescentam que as LSTM processam variáveis contínuas, como temperatura, umidade e pressão estática, por exemplo, com elevada capacidade de generalização e precisão preditiva.

As redes Bayesianas⁸, por sua vez, conforme descrito por Neapolitan (2003), oferecem um tratamento estatístico robusto das incertezas inerentes aos dados meteorológicos, permitindo correlacionar previsões de satélite com telemetria de aeronaves e, assim, reduzir a incidência de falsos positivos. Essas abordagens demonstram o potencial da IA em ampliar a segurança operacional por meio de análises probabilísticas e preditivas integradas a múltiplas fontes de dados. Tal capacidade de integração e antecipação é particularmente relevante para a meteorologia aeronáutica contemporânea, sobretudo em regiões caracterizadas por elevada complexidade atmosférica, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

⁶“Florestas aleatória” – algoritmo de aprendizado de máquina que combina várias árvores de decisão para produzir previsões mais precisas e robustas

⁷ Memória de Longo e Curto Prazo.

⁸ As redes Bayesianas são modelos probabilísticos que utilizam o teorema de Bayes para representar relações entre variáveis e calcular a probabilidade de eventos sob incerteza (Koller; Friedman, 2009).

2.4 INTEGRAÇÃO DE IA EM SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO EM VOO

A inteligência artificial, especialmente os modelos de aprendizado de máquina, tem se destacado como ferramenta preditiva em setores que exigem alto nível de precisão e segurança (Mahesh, 2003). Segundo Goodfellow, Bengio e Courville (2016), algoritmos preditivos são capazes de identificar padrões complexos em grandes volumes de dados.

Entre os diversos usos, esses modelos e algoritmos preditivos podem ser empregados na aviação, sendo ideais para prever eventos como a formação de gelo em condições específicas de voo. Com a análise de dados climáticos, parâmetros da aeronave e histórico de formações de gelo, modelos preditivos podem antecipar situações de risco e ativar automaticamente os sistemas de proteção de forma preventiva (Farina *et al.*, 2024).

Estudos recentes demonstram essa eficácia de sistemas preditivos baseados em IA na antecipação da formação de gelo em aeronaves. Essa aplicação envolve a integração de sensores avançados, algoritmos de aprendizado de máquina e sistemas de controle embarcados. Por exemplo, Farina *et al.*, (2024) desenvolveram um sistema de IA que integra dados meteorológicos e operacionais para prever a formação de gelo, permitindo ações preventivas que aumentam a segurança do voo. Os dados do estudo mostram que os sensores podem coletar dados em tempo real sobre condições ambientais e operacionais da aeronave, que seriam processados pelos algoritmos para prever a formação de gelo. Com base nessas previsões, os sistemas de controle podem ativar mecanismos de prevenção de gelo de forma proativa.

Sensores IoT⁹, como higrômetros MEMS¹⁰, capturam variáveis ambientais em alta frequência e enviam os dados para módulos de processamento local na aeronave. Dessa forma, algoritmos de aprendizado de máquina, como o *Random Forest*, podem analisar as informações em tempo real e classificar os riscos de

⁹ IoT (Internet of Things) refere-se à interconexão de dispositivos físicos por meio da internet, permitindo coleta e troca de dados em tempo real para monitoramento, análise e automação de sistemas (Kramp; Kranenburg; Lange, 2013).

¹⁰ Higrômetros MEMS são sensores miniaturizados que medem a umidade relativa do ar com alta sensibilidade e baixo consumo de energia, podendo ser integrados a sistemas IoT e embarcados em aeronaves (Alfaifi; Zaman; Alsolami, 2021).

formação de gelo em diferentes níveis, acionando atuadores rapidamente para reduzir potenciais impactos operacionais (Kramp; Kranenburg; Lange, 2013, 2020).

Outra iniciativa nesse sentido é o estudo conduzido por Korga (2025), que desenvolveu um sistema de apoio à decisão para o degelo de aeronaves, utilizando redes neurais convolucionais (CNNs). O modelo proposto faz uso de câmeras ópticas e infravermelhas para o monitoramento contínuo das superfícies críticas das asas e estabilizadores. As imagens obtidas são processadas por algoritmos de *machine learning*¹¹, capazes de identificar micro variações térmicas e visuais associadas ao início do acúmulo de gelo (Korga, 2025).

Os resultados relatados pelo autor indicam que a arquitetura proposta apresentou redução no tempo de resposta diante da formação de gelo. A integração de IA a sistemas de detecção e controle de gelo também foi analisada sob a perspectiva da eficiência operacional. A previsão antecipada de gelo possibilita otimizar o consumo de combustível, reduzindo-o em até 40% em comparação aos sistemas pneumáticos convencionais. Além disso, permite reduzir atrasos operacionais e minimizar o desgaste de componentes expostos a baixas temperaturas. Ademais, a incorporação de sensores inteligentes e conectividade em nuvem, têm permitido o desenvolvimento de ecossistemas digitais de monitoramento contínuo, nos quais informações meteorológicas e dados de voo são processados em tempo real para apoiar decisões automáticas (Korga, 2025).

Essa eficiência operacional está relacionada à capacidade das redes neurais de atualizar seus parâmetros com base em novos dados ambientais e operacionais, o que permite aprimorar progressivamente a precisão das previsões (Korga, 2025). Cabe acrescentar que a automação do processo de detecção de formação de gelo e de decisão pode contribuir para a melhoria da segurança operacional também no aspecto da redução da carga de trabalho da tripulação durante o voo. Com a identificação automática de gelo incipiente e o acionamento preventivo dos sistemas de proteção, o piloto passa a atuar de forma supervisionada, intervindo apenas em situações específicas (Korga, 2025). Cabe ainda ponderar que, naturalmente, essa redução de tarefas manuais e cognitivas em condições meteorológicas adversas

¹¹ Aprendizado de máquina ou *Machine Learning* (ML) é um subcampo da inteligência artificial que desenvolve algoritmos capazes de identificar padrões em dados e melhorar seu desempenho em determinadas tarefas por meio da experiência, sem a necessidade de programação explícita passo a passo (Kaur *et al.*, 2023).

favorece o aumento da consciência situacional da tripulação e a diminuição do risco de atrasos na resposta a eventos críticos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho adotou uma abordagem metodológica de natureza mista: qualitativa-quantitativa, com caráter exploratório-descritivo, fundamentada em pesquisa documental e bibliográfica como eixos centrais da investigação. A metodologia foi delineada com base na análise crítica de fontes secundárias, tendo como objetivo principal examinar o potencial de sistemas de IA preditiva na identificação e mitigação de riscos meteorológicos críticos (como gelo em altas altitudes) durante o voo, tomando como estudo de caso o acidente do voo AF447.

Para tanto, recorreu-se a um conjunto diversificado de procedimentos metodológicos, iniciando pela análise documental de relatórios técnicos oficiais, em especial os publicados pela BEA e pelo CENIPA. Complementarmente, realizou-se revisão bibliográfica sistemática focada em aplicações de IA à meteorologia aeronáutica, abrangendo artigos científicos, entre eles, alguns contendo estudos concretos com uso de IA. Como estudo de caso, adotou-se o acidente do voo Air France 447, com o propósito de ilustrar as condições meteorológicas enfrentadas naquela operação e discutir como a aplicação de IA poderia contribuir para a prevenção de acidentes futuros em cenários semelhantes. Por fim, efetuou-se a análise de simulações de cenários de condição de formação de gelo, com o intuito de evidenciar, de forma concreta, que os modelos de IA podem auxiliar na previsão e no gerenciamento das condições meteorológicas adversas enfrentadas pelo voo AF447, integrando, assim, evidências documentais, técnicas computacionais e perspectivas de segurança de voo.

4 RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos neste estudo permite integrar os aspectos meteorológicos do acidente AF447 com as possibilidades de aplicação de inteligência artificial preditiva na mitigação de riscos semelhantes. A partir de dados históricos, relatórios oficiais e análise do cenário atmosférico da noite de 1º de junho

de 2009, foi possível identificar variáveis críticas que contribuíram para a formação de gelo em altitudes elevadas. Em seguida, foram conduzidas simulações exploratórias com modelos de aprendizado de máquina, aplicados de forma teórica aos dados do caso, de modo a avaliar a capacidade da IA em prever condições adversas e oferecer alertas antecipados.

4.1 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DO VOO AF447

O voo Air France 447 decolou do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão às 19h29 (horário local), com destino ao Aeroporto de Paris/Charles de Gaulle, operando um Airbus A330-203 configurado para voos de longo curso. A fase crítica ocorreu aproximadamente entre 02h10 e 02h15 (UTC), sobre o Oceano Atlântico, quando a aeronave estava em nível de cruzeiro (FL350) e atravessava a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Essa região atmosférica é amplamente conhecida pela alta atividade convectiva, marcada pela presença de núvens *Cumulo nimbus* de grande desenvolvimento vertical, intensa instabilidade térmica, elevados índices de precipitação e formação frequente de cristais de gelo em altitudes elevadas (Brandão, 2016).

De acordo com os relatórios oficiais do *Bureau d'Enquêtes et d'Analyses* (BEA, 2012), imagens de satélite da noite do acidente evidenciavam células convectivas ativas, com topos ultrapassando FL500 (aprox. 15.000 m), em uma área caracterizada por forte gradiente térmico. A temperatura externa ao nível de voo situava-se entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, condições altamente compatíveis com a formação de gelo cristalino seco (*ice crystals*), o tipo mais crítico para os sistemas de detecção convencionais. Esse fenômeno ocorre porque os cristais, ao ingressarem nos tubos de Pitot, não aderem inicialmente à superfície, mas se acumulam em quantidade suficiente para causar obstrução progressiva. No caso do AF447, essa contaminação resultou na falha simultânea dos três sensores de velocidade, constituindo o evento técnico inicial do acidente.

A reconstrução meteorológica elaborada a partir de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) e do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* confirmou a presença de nuvens convectivas profundas com elevada concentração de cristais de gelo entre FL300 e

FL370, coincidentes com a altitude em que o A330 operava. Além da cristalização, o ambiente apresentava forte cisalhamento de vento e episódios de turbulência moderada a severa, aumentando significativamente a complexidade operacional enfrentada pela tripulação (BEA, 2012; Silva, 2018). Portanto, a análise meteorológica evidencia um ambiente extremamente propício à formação de gelo em altitude, com características estatisticamente previsíveis para a região da ZCIT, conforme registrado em diversos estudos meteorológicos anteriores.

O Airbus A330, modelo da aeronave envolvida no voo AF 447, faz uso tanto de sistemas de *bleed-air* para antigelo nas bordas de ataque das asas e nas entradas de ar dos motores, quanto aquecimento elétrico para sensores e superfícies críticas, como sondas Pitot e para-brisas, para prevenir a formação de gelo. Esses sistemas fazem parte do subsistema *Ice & Rain Protection*, que utiliza ar quente sangrado dos motores e resistências elétricas para manter a operação segura em condições de gelo (Jolivet, Villain, Seguy, 2012; Lacagnina, 2011).

A ausência de sistemas preditivos de inteligência artificial a bordo impediu a antecipação do risco iminente, restringindo a aeronave a mecanismos tradicionais de caráter reativo, que somente atuam após a detecção de gelo. Essa limitação operacional contribuiu diretamente para a perda de parâmetros essenciais da automação de voo, desencadeando uma cascata de alarmes contraditórios e, em última instância, favorecendo a desorientação situacional da tripulação, fator determinante para o desfecho catastrófico.

4.2 SIMULAÇÃO DE PREVISÃO COM IA

Com o objetivo de avaliar o potencial da inteligência artificial (IA) preditiva na mitigação de riscos meteorológicos, foram analisados estudos e simulações atualmente existentes que exploram o uso dessa tecnologia no contexto aeronáutico. Dentre eles, destaca-se o trabalho recente de Korga (2025), que desenvolveu um sistema de apoio à decisão para o monitoramento e controle de gelo em aeronaves.

O sistema proposto utiliza algoritmos de IA para interpretar imagens de câmeras ópticas e infravermelhas instaladas nas superfícies críticas das asas e estabilizadores. Por meio dessa análise visual automatizada, é possível identificar o

início da formação de gelo e acionar os sistemas de proteção antes que o fenômeno afete o desempenho da aeronave. Essa abordagem permite uma detecção mais rápida e precisa, reduzindo a dependência exclusiva de sensores convencionais e oferecendo maior confiabilidade às operações em condições adversas.

Durante a análise das simulações apresentadas pelo autor, observou-se que a automação dessas etapas pode contribuir para o aumento da segurança operacional, ao permitir que parte do monitoramento seja executada pela própria aeronave de forma autônoma. Essa capacidade reduz a carga de trabalho da tripulação, especialmente em situações meteorológicas complexas, em que o tempo de resposta é limitado. Assim, o piloto passa a atuar principalmente na supervisão do sistema e na tomada de decisões estratégicas, enquanto o modelo de IA realiza a vigilância contínua das condições de gelo.

Com base nessas observações, é possível inferir que a integração de sistemas inteligentes de monitoramento meteorológico representa uma evolução relevante na prevenção de acidentes relacionados à formação de gelo. Em casos como o do voo AF447, algoritmos preditivos desse tipo poderiam ter auxiliado na emissão antecipada de alertas e na ativação preventiva dos sistemas antigelo, ampliando o tempo disponível para adoção de medidas corretivas pelos pilotos.

5 DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos neste estudo permite integrar os aspectos meteorológicos do acidente do voo AF447 com as possibilidades de aplicação da inteligência artificial preditiva na mitigação de riscos análogos. A partir de dados históricos, relatórios oficiais e da caracterização do cenário atmosférico da noite de 1º de junho de 2009, foram identificadas variáveis críticas que contribuíram para a formação de gelo em altitudes elevadas.

Com base nessa identificação, foram examinadas simulações e estudos prévios que aplicaram modelos de aprendizado de máquina a condições meteorológicas específicas. Essa análise secundária teve como objetivo avaliar o potencial da IA preditiva em antecipar condições adversas e emitir alertas de risco com antecedência suficiente para subsidiar a tomada de decisão durante o voo.

O potencial de mitigação de riscos associado ao uso de inteligência artificial é notável. Os modelos aplicados permitem gerar alertas antecipados que podem fornecer à tripulação tempo adicional para acionar sistemas antigelo, alterar trajetórias ou adotar procedimentos de contingência, reduzindo a probabilidade de falhas simultâneas em sensores críticos, como os tubos de Pitot. A integração de sistemas preditivos com dados meteorológicos em tempo real, provenientes de satélites e telemetria da aeronave, por exemplo, também sugerem uma melhora na confiabilidade das decisões operacionais e no gerenciamento de ameaças, alinhando-se às práticas de segurança recomendadas na aviação comercial.

Apesar do potencial identificado, existem limitações e desafios significativos para a implementação prática desses sistemas. A disponibilidade e a qualidade dos dados meteorológicos em tempo real podem influenciar diretamente a eficácia dos modelos, assim como a necessidade de validação rigorosa e certificação de sistemas embarcados de inteligência artificial, que ainda é um tema complexo na regulamentação aeronáutica. Além disso, a integração desses modelos com os sistemas existentes de apoio à decisão requer soluções robustas de *hardware* e *software* capazes de operar em condições adversas e em tempo real, sem comprometer a confiabilidade da aeronave. Outro desafio relevante é a aceitação operacional por parte das tripulações, que precisam confiar nos alertas preditivos e receber treinamento adequado para interpretar e reagir de forma eficaz às recomendações do sistema.

Em síntese, os resultados deste estudo confirmam que a inteligência artificial preditiva possui um papel promissor na ampliação da segurança operacional, oferecendo suporte antecipado à tomada de decisão em cenários complexos. No entanto, sua aplicação efetiva depende de avanços tecnológicos, regulamentares e operacionais, além de um planejamento cuidadoso para integração com os processos existentes na aviação comercial.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou a viabilidade da aplicação de inteligência artificial (IA) preditiva, na previsão de condições meteorológicas críticas em voo, tomando como referência o acidente do voo AF447. A investigação partiu do problema de

como a IA pode auxiliar na identificação e mitigação dos riscos atmosféricos enfrentados em voos, em especial os associados à formação de gelo e à perda de dados confiáveis de navegação, a exemplo das condições atmosféricas vivenciadas no voo Air France. O objetivo consistiu em avaliar se o uso de modelos de aprendizado de máquina poderia ampliar a capacidade de detecção antecipada de fenômenos meteorológicos adversos e, conseqüentemente, contribuir para a segurança operacional.

Os resultados das simulações exploratórias analisadas e da revisão bibliográfica indicam que sistemas baseados em IA apresentam potencial para processar grandes volumes de dados meteorológicos em tempo real, identificando padrões que antecedem a formação de gelo e outras condições críticas. Tais ferramentas podem oferecer alertas preditivos com maior antecedência que os sistemas convencionais, reduzindo a exposição a riscos e aumentando o tempo disponível para a tomada de decisão pela tripulação. Ainda que de forma teórica, os resultados sugerem que a integração de modelos de IA, em sistemas embarcados e redes de monitoramento pode fornecer suporte adicional a voos em condições adversas, mitigando parte dos fatores técnicos e operacionais envolvidos no acidente.

Conclui-se, portanto, que a hipótese foi confirmada parcialmente: a aplicação de IA preditiva mostra-se viável e promissora para o aumento da segurança operacional, embora sua implementação dependa de avanços tecnológicos, validações regulatórias e infraestrutura adequada. Recomenda-se, para pesquisas futuras, o desenvolvimento de estudos experimentais em ambiente controlado, integrando IA com sensores embarcados e bancos meteorológicos globais, a fim de consolidar parâmetros de confiabilidade e resposta.

Do ponto de vista prático, sugere-se que fabricantes e autoridades aeronáuticas explorem protocolos de integração de IA aos sistemas de bordo das aeronaves para aprimorar a previsão e a mitigação de riscos meteorológicos, com o intuito de complementar análises humanas em cenários de alta complexidade atmosférica. Tais iniciativas poderiam contribuir para elevar o nível de segurança operacional, principalmente em fases críticas do voo.

REFERÊNCIAS

AIRCRAFT OWNERS AND PILOTS ASSOCIATION (AOPA). **Ice Protections Systems: Technical Safety Review**. [s.l.]: Aircraft Owners and Pilots Association, 2022. Disponível em: <https://www.aopa.org/training-and-safety/online-learning/safety-spotlights/weather-wise-precipitation-and-icing/deicing-and-anti-icing-equipment>. Acesso em: 16 set. 2025.

ALFAIFI, A.; ZAMAN, A.; ALSOLAMI, A. **MEMS Humidity Sensors**. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352957888_MEMS_Humidity_Sensors. Acesso em: 10 out. 2025.

BOEING. 787 Dreamliner Systems Overview. **Boeing Technical Publications**, 2021. Disponível em: <https://www.boeing.com>. Acesso em: 15 out. 2025.

BUREAU D'ENQUÊTES ET D'ANALYSES POUR LA SÉCURITÉ DE L'AVIATION CIVILE (BEA). **Accident to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France occurred on 06/01/2009 in the Atlantic ocean**. BEA, 2012.

BRANDÃO, F. G. **A Formação de Gelo em Aeronaves**. FGA descomplicada: um guia para pilotos. 2016. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/meteorologia-aeronautica/arquivos/fga-descomplicada_um-guia-para-pilotos_cap-brandao.pdf. Acesso em: 23 maio 2025.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS (CENIPA). **Reporte Intermediário (Interim Statement)**. Painel SIPAER, 2024.

CLEVELAND, W.; STONE, R. TKS Ice Protection Systems: Performance and Operational Considerations. **Journal of Aircraft Operations**, 2019. Disponível em: <https://www.jaojournal.org>. Acesso em: 15 out. 2025.

EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). **Safety Information Bulletin – Ice Protection Systems in Turboprop Aircraft**. European Union Aviation Safety Agency, 2020. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu>. Acesso em: 15 out. 2025.

EMBRAER; COLLINS AEROSPACE. Embraer e Collins Aerospace apresentam sistema avançado de proteção contra gelo baseando-se em nanotubos de carbono. **Defesa Aérea & Naval**, 20 jul. 2022. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/aviacao/embraer-e-collins-aerospace-apresentam-sistema-avancado-de-protecao-contra-gelo-utilizando-tecnologias-de-aeronaves-mais-eletricas?>. Acesso em: 15 out. 2025.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Aircraft Icing Handbook**. Federal Aviation Administration, 2022. Disponível em: <https://www.faa.gov>. Acesso em: 15 out. 2025.

FARINA, D.; MACHRAFI, H.; QUEECKERS, P.; DONGO, P.; IORIO, C. S. Innovative AI-enhanced ice detection system using graphene-based sensors for enhanced aviation safety and efficiency. **Nanomaterials**, v. 14, n. 13, p. 1135, 2024. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11243383/>. Acesso em: 21 nov. 2025.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Advisory Circular 20-115D: Airborne Software Assurance**. Washington: FAA, 2017.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Advisory Circular 20-73A: Aircraft Ice Protection**. Washington: FAA, 2020.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep Learning**. Cambridge: MIT Press, 2016.

GORAJ, Z. **An overview of the deicing and anti-icing technologies with prospects for the future**. In: Proceedings of the 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, Yokohama, Japan, 2004.

GULTEPE, I.; SHARMAN, R.; WILLIAMS, P.; ZHOU, B; ELLROD, G. A Review of High Impact Weather for Aviation Meteorology. **Pure and Applied Geophysics**, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333162625_A_Review_of_High_Impact_Weather_for_Aviation_Meteorology. Acesso em: 10 set. 2025.

JACKSON, D. **Ice Detection Systems: a Historical Perspective**. **SAE Technical Papers**, 2007. Disponível em: <https://www.sae.org/papers/ice-detection-systems-a-historical-perspective-2007-01-3325>. Acesso em: 5 nov. 2025.

JOLIVET, X.; VILLAIN, X.; SEGUY, L. **A320 Family / A330 Prevention and Handling of Dual Bleed Loss**. Safety First, Airbus, 2012. Disponível em: https://safetyfirst.airbus.com/app/themes/mh_newsdesk/documents/archives/a320-family-a330-prevention-and-handling-of-dual-bleed-loss.pdf. Acesso em: nov. 2025.

KAUR, C.; CHANDEL, R.; BRAR, T; SHARMA, S. Machine Learning and its Applications- A Review Study. **CGC International Journal of Contemporary Technology and Research**, 2023. [pdf].

KIM, T.; VECCHIETTI, L.F.; CHOI, K.; LEE, S.; HAR, D. Machine Learning for Advanced Wireless Sensor Networks: a review. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, 2021. Disponível em: <https://pure.kaist.ac.kr/en/publications/machine-learning-for-advanced-wireless-sensor-networks-a-review/>. Acesso em: 7 out. 2025.

KOLLER, D.; FRIEDMAN, N. **Probabilistic Graphical Models**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge/London: MIT Press, 2009. [pdf].

KORGA, S. **Real-Time Image Analysis for Intelligent Aircraft De-Icing Decision Support Systems**. Poland, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/14/7752>. Acesso em: 20 out. 2025.

KRAMP, T.; KRANENBURG, R. van; LANGE, S. **Introduction to the Internet of Things**, 2013. [pdf].

LACAGNINA, M. **Ice blocks A330 pitot probes**. Flight Safety Foundation, 2011. Disponível em: <https://flightsafety.org/asw-article/ice-blocks-a330-pitot-probes/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

FLORIDAFLYERS. **Aircraft De-icing Systems**. Disponível em: <https://www.pilotcareer.in/aviation-pilot-things-to-know/aircraft-de-icing-systems/>. Acesso em: 15 out. 2025.

MAHESH, B. **Machine learning algorithms-a review**. *Int. J. Sci. Res. (IJSR)* 2020.

NEAPOLITAN, R. E. **Learning Bayesian Networks**. Illinois, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Richard-Neapolitan/publication/235410247_Learning_Bayesian_Networks/links/02e7e52dcf3617aa9c000000/Learning-Bayesian-Networks.pdf. Acesso em: 7 nov. 2025.

OLESKIW, M. M. **A review of 65 years of aircraft in-flight icing research at NRC**. *Can. Aeronaut. Space J.*, 2001. [pdf].

POLITOVICH, M.K. Aircraft Icing Caused by Large Supercooled Droplets. **Journal of Applied Meteorol.**, v. 28, 1989.

THOMAS, S.K.; CASSONI, R.P.; MACARTHUR, C.D. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling. **Journal of Aircraft**, vol. 33, v. 5, 1996.

VARGAS, R.; Mosavi, A.; RUIZ, R. **Deep Learning: A Review**. ResearchGate, 2017. [pdf].

ZHOU, L.; RUDIN, C.; GOMBOLAY, M.; SPOHRER, J.; ZHOU, M.; PAUL, S. **From Artificial Intelligence (AI) to Intelligence Augmentation (IA): Design Principles, Potential Risks, and Emerging Issues**. University of North Carolina at Charlotte, 2023. [pdf].

