

# INFERÊNCIA ESTATÍSTICA BAYESIANA NA SEGURANÇA DE VOO

BAYESIAN STATISTICAL INFERENCE IN AVIATION SAFETY

Engenharias • 03/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/780444627](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/780444627)

Rodrigo Luiz de Souza Rodrigues<sup>1</sup>

## RESUMO

O presente artigo analisa a inferência estatística bayesiana como estrutura conceitual aplicável à atualização dinâmica do risco operacional na segurança de voo. A pesquisa tem como objetivo examinar como a lógica bayesiana pode apoiar Sistemas de Gerenciamento da Segurança Operacional na revisão contínua da percepção de risco diante de novas evidências. Metodologicamente, trata-se de uma revisão conceitual, de abordagem qualitativa e finalidade exploratória, baseada em literatura sobre inferência bayesiana, segurança sistêmica, gerenciamento de risco, tomada de decisão sob incerteza e Safety Management Systems. A análise demonstra que relatos voluntários, auditorias, treinamentos, registros de manutenção, indicadores operacionais e julgamento especializado podem funcionar como evidências capazes de modificar estimativas iniciais de risco. Os resultados indicam que a abordagem bayesiana contribui para organizar o raciocínio decisório no SMS, especialmente em cenários de eventos raros, dados incompletos e sinais operacionais fracos. Conclui-se que a inferência bayesiana não substitui os processos formais de segurança, mas oferece uma lógica útil para integrar evidências, explicitar incertezas, revisar prioridades e apoiar decisões preventivas na segurança de voo.

**Palavras-chave:** Inferência bayesiana; Segurança de voo; Aviação civil; Gerenciamento de risco; Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional.

## ABSTRACT

This article analyzes Bayesian statistical inference as a conceptual framework applicable to the dynamic updating of operational risk in aviation safety. The objective of the study is to examine how Bayesian logic can support Safety Management Systems in the

continuous revision of risk perception when new evidence becomes available. Methodologically, this is a conceptual review with a qualitative approach and exploratory purpose, based on literature on Bayesian inference, systemic safety, risk management, decision-making under uncertainty, and Safety Management Systems. The analysis demonstrates that voluntary reports, audits, training records, maintenance data, operational indicators, and expert judgment may function as evidence capable of modifying initial risk estimates. The results indicate that the Bayesian approach contributes to organizing decision-making reasoning within the SMS, especially in scenarios involving rare events, incomplete data, and weak operational signals. It is concluded that Bayesian inference does not replace formal safety processes, but offers a useful logic for integrating evidence, making uncertainty explicit, revising priorities, and supporting preventive decisions in aviation safety.

**Keywords:** Bayesian inference; Aviation safety; Civil aviation; Risk management; Safety Management System.

## 1. INTRODUÇÃO

A segurança de voo constitui uma dimensão essencial da aviação civil contemporânea, pois envolve a identificação de perigos, a avaliação de riscos e a tomada de decisões capazes de preservar a integridade das operações aéreas em ambientes complexos. A Organização da Aviação Civil Internacional estabelece que a gestão da segurança deve apoiar Estados e provedores de serviço na implementação de programas e sistemas estruturados de segurança operacional, com práticas adaptadas ao contexto específico de cada organização (ICAO, 2018, p. iv-v).

Na mesma direção, a *Federal Aviation Administration* define o *Safety Management System* como uma abordagem organizacional e preventiva, composta por política de segurança, cultura positiva, métodos formais de identificação de perigos, mitigação de riscos e garantia do desempenho da segurança (FAA, 2024, p. i).

A evolução dos estudos sobre acidentes demonstra que a segurança não pode ser compreendida apenas pela ausência de eventos adversos ou pela identificação de falhas individuais. Em sistemas complexos, acidentes podem emergir da interação entre fatores técnicos, humanos, organizacionais e regulatórios. Leveson (2004, p. 237) sustenta que a análise de segurança deve considerar controles, restrições e interações sistêmicas, e não somente cadeias lineares de falhas.

Essa perspectiva é particularmente relevante para a aviação, uma vez que as operações aéreas dependem da integração entre tripulações, manutenção, controle de tráfego aéreo, treinamento, supervisão, tecnologia, infraestrutura e gestão organizacional. Assim, o risco operacional não se apresenta como uma informação simples ou estática, mas como uma estimativa sujeita a mudanças conforme novas evidências surgem (Reason, 1997, p. 10-12).

No âmbito do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional, a avaliação de risco normalmente envolve a classificação de perigos segundo critérios como probabilidade, severidade, exposição e aceitabilidade. Esse processo é necessário para organizar prioridades e orientar decisões gerenciais, mas pode apresentar limitações quando utilizado de forma rígida ou predominantemente retrospectiva. A ICAO destaca que informações

de segurança devem ser transformadas em conhecimento acionável para apoiar a tomada de decisão (ICAO, 2018, p. v).

O problema se torna mais evidente em cenários nos quais há poucos eventos registrados, baixa frequência de ocorrências graves ou grande dependência de evidências qualitativas. A ausência de acidentes recentes não significa, necessariamente, ausência de risco, pois perigos latentes podem permanecer presentes no sistema antes de se manifestarem em ocorrências observáveis (Reason, 1997, p. 10-12).

Por essa razão, a segurança de voo não deve depender apenas de estatísticas históricas. Relatos voluntários, auditorias, dados de treinamento, registros de manutenção, ocorrências operacionais, indicadores de desempenho e julgamento especializado também podem funcionar como evidências relevantes para reavaliar a percepção de risco. A FAA observa que o SMS deve apoiar lideranças, gestores e empregados na tomada de decisões efetivas e informadas sobre segurança (FAA, 2024, p. i).

É nesse ponto que a inferência estatística bayesiana se torna conceitualmente relevante para a segurança de voo, pois permite compreender uma estimativa inicial de risco como algo revisável, que pode ser atualizado à medida que novas informações se tornam disponíveis. Em termos estatísticos, essa diferença pode ser compreendida pela distinção entre uma leitura predominantemente frequentista e uma leitura bayesiana do risco: a abordagem frequentista tende a interpretar a probabilidade a partir da frequência observada de eventos em uma série histórica, enquanto a abordagem bayesiana admite que uma organização

parta de uma estimativa inicial e a revise quando novas evidências surgem (Berry, 1996, p. 1-3).

Pearl (1988, p. 29-32) apresenta o raciocínio probabilístico como forma de representar crenças plausíveis em contextos marcados por incerteza, enquanto Gelman et al. (2013, p. 6-8) tratam a inferência bayesiana como uma estrutura capaz de combinar informação prévia, dados observados e incerteza. Assim, de forma simplificada, enquanto a lógica frequentista pergunta “com que frequência isso ocorreu?”, a lógica bayesiana acrescenta “como a percepção de risco deve mudar diante desta nova evidência?” (Gelman *et al.*, 2013, p. 6-8).

Aplicada à segurança de voo, essa lógica permite interpretar o risco operacional não como categoria fixa, mas como percepção dinâmica. Uma organização pode classificar inicialmente determinado perigo como pouco provável, mas essa avaliação deve ser revista se surgirem relatos recorrentes, achados de auditoria, dificuldades em treinamento ou tendências de manutenção associadas ao mesmo tipo de evento (ICAO, 2018, p. 2-19).

Estudos internacionais indicam que abordagens bayesianas podem contribuir para avaliações de segurança na aviação. Zhang e Mahadevan (2021, p. 1) aplicam redes bayesianas à análise de relatórios de investigação de acidentes aéreos, buscando representar relações causais em sequências de eventos. Esse tipo de estudo demonstra que a lógica bayesiana pode organizar evidências, representar dependências entre fatores e apoiar avaliações probabilísticas em cenários complexos (Zhang; Mahadevan, 2021, p. 1).

Entretanto, o presente artigo não pretende desenvolver um modelo matemático, testar uma rede bayesiana ou realizar análise estatística com banco de dados próprio. A proposta é conceitual. O foco está em discutir como a lógica de atualização bayesiana pode fortalecer a percepção dinâmica do risco operacional dentro do SMS.

Diante desse contexto, o problema de pesquisa que orienta este artigo é o seguinte: como a inferência estatística bayesiana pode contribuir, de forma conceitual, para a atualização dinâmica do risco operacional na segurança de voo? A relevância do problema decorre da necessidade de aperfeiçoar práticas de gerenciamento da segurança em ambientes nos quais decisões são tomadas com informações incompletas, sinais fracos, eventos raros e múltiplas fontes de evidência.

A justificativa teórica está na aproximação entre inferência bayesiana, segurança sistêmica, tomada de decisão sob incerteza e gerenciamento do risco operacional. A justificativa prática está na possibilidade de oferecer ao SMS uma estrutura de raciocínio capaz de integrar relatos voluntários, auditorias, treinamentos, registros de manutenção, indicadores operacionais e julgamento especializado (ICAO, 2018, p. 9-3).

O artigo também considera que a qualidade da inferência depende da qualidade das evidências disponíveis. Por isso, a coleta de dados em sistemas de *safety* deve ser compreendida não apenas em termos de quantidade, mas também de variedade, confiabilidade, rastreabilidade, atualidade e utilidade para a decisão gerencial (FAA, 2024, p. 4-1).

O objetivo geral deste artigo é analisar, em perspectiva conceitual, como a inferência estatística bayesiana pode apoiar a atualização dinâmica do risco operacional na segurança de voo. Para atingir esse objetivo, o estudo busca explicar os fundamentos conceituais da inferência bayesiana, relacionar essa lógica à tomada de decisão sob incerteza, identificar aplicações possíveis no SMS e discutir vantagens, limitações e cuidados metodológicos da abordagem.

Metodologicamente, o estudo caracteriza-se como uma revisão conceitual, de abordagem qualitativa e finalidade exploratória. O artigo não pretende testar empiricamente um modelo estatístico, aplicar uma rede bayesiana a dados reais ou validar uma ferramenta operacional. Os exemplos numéricos apresentados possuem finalidade didática e servem apenas para demonstrar como a lógica de atualização pode apoiar o raciocínio do SMS (Gil, 2002, p. 41).

Dessa forma, o artigo defende que a inferência bayesiana pode contribuir para uma compreensão mais adaptativa do risco operacional. Ao tratar o risco como uma estimativa revisável, a segurança de voo passa a ser compreendida como um processo contínuo de aprendizagem, atualização e decisão baseada em evidências.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Segurança de Voo na Aviação Civil**

A segurança de voo constitui um campo de estudo voltado à prevenção de acidentes, incidentes e condições operacionais capazes de comprometer a integridade das operações aéreas. No âmbito internacional, a gestão da segurança é compreendida como uma responsabilidade organizada, contínua e sistêmica, na qual

Estados e provedores de serviço devem estabelecer processos capazes de identificar perigos, avaliar riscos e monitorar o desempenho da segurança operacional (ICAO, 2018, p. iv-v).

Essa compreensão amplia a noção tradicional de segurança como mera ausência de acidentes. Em sistemas complexos, a ausência de ocorrências graves não demonstra, por si só, que o risco esteja controlado, pois determinadas fragilidades podem permanecer latentes até que fatores técnicos, humanos e organizacionais se combinem em uma situação crítica (Reason, 1997, p. 10-12).

A aviação civil exige atenção especial porque envolve interdependência entre pilotos, controladores de tráfego aéreo, mecânicos, gestores, reguladores, infraestrutura aeroportuária, fabricantes e sistemas tecnológicos. Essa interdependência torna insuficiente uma leitura exclusivamente individualizada do erro, uma vez que o desempenho operacional depende da interação entre pessoas, procedimentos, equipamentos e contexto organizacional (Leveson, 2004, p. 237).

Nesse sentido, a segurança de voo deve ser compreendida como resultado de processos organizacionais que antecipam, controlam e aprendem com perigos operacionais. A perspectiva sistêmica permite deslocar o foco da culpa individual para a análise das condições que tornam determinados comportamentos ou decisões mais prováveis em ambientes de alta complexidade (Dekker, 2012, p. 21-24).

## **2.2. Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional**

O Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional, conhecido internacionalmente como *Safety Management System*, representa

uma abordagem estruturada para administrar a segurança de forma integrada à gestão organizacional. A ICAO define o SMS como instrumento essencial para que provedores de serviço gerenciem riscos de segurança de maneira sistemática, conforme as disposições do Annex 19 e do Safety Management Manual (ICAO, 2018, p. 9-1).

A FAA apresenta o SMS como uma abordagem formal, organizacional e preventiva, composta por política de segurança, gerenciamento do risco, garantia da segurança e promoção da segurança. Essa estrutura busca apoiar decisões gerenciais informadas, fortalecer a cultura de segurança e organizar processos de identificação de perigos e mitigação de riscos (FAA, 2024, p. i).

O SMS não deve ser tratado como um conjunto burocrático de formulários, mas como um sistema de aprendizagem contínua. Sua efetividade depende da capacidade da organização de transformar informações de segurança em conhecimento útil para a tomada de decisão, especialmente quando essas informações surgem de fontes diferentes, como relatos voluntários, auditorias, ocorrências operacionais, treinamento e manutenção (ICAO, 2018, p. 9-3).

A lógica do SMS também exige que a segurança seja acompanhada por indicadores, processos de monitoramento e mecanismos de revisão. A FAA destaca que o gerenciamento do risco dentro do SMS deve estar associado a processos documentados, responsabilidades definidas e critérios capazes de orientar decisões sobre perigos e controles operacionais (FAA, 2024, p. 2-1).

### **2.3. Gerenciamento do Risco Operacional**

O gerenciamento do risco operacional constitui uma das funções centrais do SMS, pois permite identificar perigos, estimar suas consequências e definir medidas de mitigação. No modelo da ICAO, o gerenciamento do risco envolve identificação de perigos, avaliação de consequências, análise de probabilidade e severidade, controle do risco e monitoramento da eficácia das ações adotadas (ICAO, 2018, p. 2-19).

Esse processo costuma ser operacionalizado por matrizes de risco, nas quais a severidade e a probabilidade são combinadas para indicar prioridades de ação. Embora esse recurso seja útil para padronizar decisões, ele pode se tornar limitado quando aplicado de maneira rígida, principalmente em ambientes nos quais os dados são incompletos, os eventos graves são raros e as evidências qualitativas possuem relevância operacional (Leveson, 2004, p. 246-248).

A gestão do risco não se limita ao cálculo da probabilidade de ocorrência de um evento. Ela também envolve julgamento técnico, interpretação de sinais fracos, análise de condições latentes e avaliação da eficácia das barreiras existentes (Reason, 1997, p. 9-11).

Por essa razão, a classificação inicial de um perigo deve ser compreendida como uma estimativa provisória. À medida que novas evidências aparecem, a organização deve revisar sua percepção sobre exposição, probabilidade, severidade e prioridade de tratamento do risco (ICAO, 2018, p. 2-21).

#### **2.4. Tomada de Decisão Sob Incerteza na Aviação**

A tomada de decisão na aviação ocorre frequentemente sob incerteza, pois operadores e gestores nem sempre dispõem de

informações completas, atualizadas ou perfeitamente mensuráveis. Essa característica torna a segurança de voo dependente de processos capazes de interpretar evidências parciais, reconhecer mudanças no contexto operacional e ajustar decisões conforme novos sinais aparecem (FAA, 2024, p. 3-1).

Leveson (2004, p. 250) argumenta que acidentes em sistemas complexos podem resultar de controles inadequados, interações não previstas e falhas no processo de adaptação organizacional. Essa perspectiva reforça a necessidade de modelos de segurança que considerem não apenas eventos passados, mas também condições presentes e possíveis trajetórias futuras do sistema.

A decisão sob incerteza é especialmente relevante para o SMS porque muitas informações importantes não surgem na forma de acidentes ou incidentes graves. Relatos de baixa severidade, tendências de manutenção, dificuldade recorrente em treinamento, achados de auditoria e desvios operacionais podem indicar fragilidades que ainda não se converteram em eventos críticos (ICAO, 2018, p. 3-6).

Nesse contexto, a cultura justa possui papel relevante. Dekker (2012, p. 33-35) sustenta que a aprendizagem organizacional depende de um ambiente no qual profissionais possam relatar erros, dúvidas e fragilidades sem medo de punição automática. Essa condição é importante porque a qualidade das evidências disponíveis ao SMS depende da disposição dos profissionais em reportar informações relevantes.

## **2.5. Fundamentos Conceituais da Inferência Bayesiana**

A compreensão da inferência bayesiana pode ser facilitada quando comparada, inicialmente, com a lógica frequentista, pois as duas abordagens expressam formas distintas de interpretar a probabilidade e a incerteza. Na abordagem frequentista, a probabilidade é associada à frequência relativa de um evento em uma sequência de observações ou repetições, sendo comum estimá-la pela proporção entre o número de ocorrências observadas e o número total de observações analisadas (Berry, 1996, p. 1-3). De forma simplificada, essa lógica pode ser representada pela expressão  $P(E) = n(E) / N$ , em que  $P(E)$  representa a probabilidade estimada do evento,  $n(E)$  corresponde ao número de vezes em que o evento foi observado e  $N$  representa o número total de observações analisadas (Berry, 1996, p. 1-3). Assim, se determinado tipo de ocorrência apareceu cinco vezes em cem operações observadas, a estimativa frequentista simples indicaria uma frequência relativa de cinco por cento, desde que as observações sejam comparáveis e façam parte de uma base adequada para esse tipo de inferência (Berry, 1996, p. 1-3).

Essa abordagem é útil quando há dados numerosos, consistentes e comparáveis, mas pode apresentar limitações em contextos nos quais eventos graves são raros, os dados são incompletos ou as evidências relevantes não aparecem apenas na forma de ocorrências repetidas (Reason, 1997, p. 10-12). Na segurança de voo, essa limitação é importante porque a baixa frequência de acidentes ou incidentes graves não significa, necessariamente, que o risco esteja controlado, já que condições latentes podem permanecer presentes no sistema antes de se manifestarem em eventos observáveis (Reason, 1997, p. 10-12). Um perigo operacional pode existir antes de aparecer em números expressivos, sobretudo quando decorre de interações entre fatores técnicos, humanos,

organizacionais e contextuais em sistemas complexos (Leveson, 2004, p. 237). Relatos voluntários, auditorias, dificuldades em treinamento, achados de manutenção e indicadores de desempenho podem revelar fragilidades que ainda não produziram eventos estatisticamente frequentes, mas que possuem relevância para o gerenciamento preventivo da segurança operacional (ICAO, 2018, p. 2-19).

A inferência bayesiana oferece uma lógica complementar porque permite partir de uma estimativa inicial e atualizá-la à medida que novas evidências se tornam disponíveis (Gelman et al., 2013, p. 6-8). Pearl (1988, p. 29-32) apresenta o raciocínio probabilístico como uma forma de representar crenças plausíveis em contextos marcados por incerteza, enquanto Gelman et al. (2013, p. 6-8) tratam a inferência bayesiana como uma estrutura capaz de combinar informação prévia, dados observados e incerteza. Essa perspectiva é adequada para o SMS porque a gestão da segurança deve utilizar informações de segurança para apoiar decisões, monitorar perigos e revisar controles quando novas evidências indicam alterações no cenário operacional (ICAO, 2018, p. 9-3).

A formulação clássica da inferência bayesiana pode ser representada pela expressão  $P(H|E) = [P(E|H) \times P(H)] / P(E)$ , em que  $P(H)$  representa a probabilidade prévia de uma hipótese ou estimativa inicial,  $P(E|H)$  indica a probabilidade de observar determinada evidência caso a hipótese seja verdadeira,  $P(E)$  corresponde à probabilidade geral da evidência e  $P(H|E)$  representa a probabilidade posterior, isto é, a estimativa atualizada depois da incorporação da nova evidência (Berry, 1996, p. 1-3). Essa estrutura permite compreender que a avaliação inicial de um risco não precisa permanecer fixa quando surgem informações relevantes capazes de modificar a

compreensão do cenário operacional, pois a inferência bayesiana interpreta a aprendizagem como atualização progressiva diante de evidências novas (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

Aplicada ao SMS, essa lógica permite interpretar o risco operacional como uma estimativa dinâmica, sensível ao acúmulo de evidências formais e informais provenientes da operação (ICAO, 2018, p. 2-19). Uma organização pode classificar inicialmente determinado perigo como de baixa probabilidade, mas essa avaliação deve ser revista se surgirem relatos recorrentes, achados de auditoria, dificuldade de proficiência em treinamento ou registros de manutenção associados ao mesmo tipo de condição, pois o gerenciamento do risco operacional exige identificação de perigos, avaliação de consequências, análise de probabilidade e revisão de controles (ICAO, 2018, p. 2-19). Assim, a diferença central entre as duas abordagens pode ser resumida da seguinte forma: a lógica frequentista pergunta “com que frequência isso ocorreu?”, enquanto a lógica bayesiana acrescenta “como esta nova evidência deve alterar a percepção atual do risco?”, síntese coerente com a distinção entre probabilidade baseada em frequência observada e probabilidade tratada como atualização de crença sob incerteza (Berry, 1996, p. 1-3).

Essa comparação não tem o objetivo de desqualificar a abordagem frequentista, pois dados históricos e frequências observadas continuam sendo relevantes para o gerenciamento da segurança operacional e para a análise do desempenho de segurança (ICAO, 2018, p. 4-3). O ponto central é que, em ambientes complexos e com eventos raros, a inferência bayesiana amplia a capacidade interpretativa do SMS ao permitir que a organização combine histórico operacional, julgamento especializado e evidências

recentes em um processo contínuo de atualização da percepção de risco (Gelman et al., 2013, p. 6-8). Desse modo, a abordagem bayesiana reforça a ideia de que a segurança de voo depende não apenas de contar eventos passados, mas também de interpretar evidências emergentes capazes de antecipar vulnerabilidades antes que elas se convertam em ocorrências graves (Reason, 1997, p. 10-12).

## **2.6. Atualização Bayesiana da Percepção de Risco**

A atualização bayesiana da percepção de risco pode ser entendida como um processo de aprendizagem progressiva. Uma estimativa inicial de risco é formulada com base em histórico, experiência operacional, julgamento técnico e classificação inicial do perigo; depois, essa estimativa é ajustada conforme novas evidências se acumulam (Gelman *et al.*, 2013, p. 6-8).

Na segurança de voo, essa lógica é útil porque muitos perigos relevantes não aparecem imediatamente em estatísticas de acidentes. Um evento raro pode ter baixa frequência histórica e, ainda assim, representar risco significativo se houver evidências indiretas de fragilidade, como repetição de desvios, falhas de treinamento, achados de auditoria ou registros de manutenção relacionados ao mesmo processo operacional (Reason, 1997, p. 10-12).

Zhang e Mahadevan (2021, p. 1) demonstram a aplicabilidade de redes bayesianas à avaliação da segurança na aviação ao analisar relatórios de investigação de acidentes e representar relações causais entre fatores presentes em sequências de eventos. Esse tipo de estudo evidencia que a abordagem bayesiana pode organizar dependências entre fatores de risco, mesmo quando o fenômeno analisado envolve múltiplas causas e incertezas.

A contribuição conceitual dessa abordagem para o SMS está na possibilidade de integrar diferentes fontes de evidência. Relatos voluntários, auditorias, indicadores, dados de treinamento, manutenção e julgamento especializado podem atuar como informações capazes de alterar a percepção do risco operacional, sem que a organização precise aguardar a ocorrência de um acidente grave para revisar suas prioridades (FAA, 2024, p. 3-3).

## **2.7. Indicadores Reativos, Proativos e Preditivos no SMS**

Os indicadores de segurança podem ser compreendidos como instrumentos de acompanhamento do desempenho operacional e de apoio à tomada de decisão. No SMS, indicadores reativos normalmente se baseiam em eventos já ocorridos, enquanto indicadores proativos buscam identificar condições de risco antes da ocorrência de danos, e indicadores preditivos procuram antecipar tendências futuras com base em padrões observáveis (ICAO, 2018, p. 4-3).

A distinção entre esses tipos de indicadores é importante porque uma gestão de segurança madura não deve depender apenas da análise retrospectiva de acidentes e incidentes. A FAA orienta que o SMS utilize processos de garantia da segurança para monitorar controles, avaliar desempenho e identificar mudanças que possam afetar o risco operacional (FAA, 2024, p. 4-1).

A abordagem bayesiana dialoga especialmente com indicadores proativos e preditivos, pois permite revisar estimativas à medida que novas evidências são incorporadas. Esse raciocínio é compatível com a necessidade de interpretar sinais fracos e tendências operacionais

antes que eles se convertam em ocorrências de maior severidade (Pearl, 1988, p. 31-33).

Essa integração é relevante porque a segurança de voo depende tanto de dados quantitativos quanto de evidências qualitativas. Um relato voluntário recorrente, um achado de auditoria repetido ou uma dificuldade observada em treinamento podem ter valor decisório mesmo quando ainda não há volume estatístico suficiente para caracterizar uma tendência robusta (Dekker, 2012, p. 37-39).

Dessa forma, a revisão da literatura indica que a inferência bayesiana oferece uma base conceitual coerente com o SMS, pois permite tratar o risco operacional como uma estimativa revisável, sensível a novas evidências e compatível com ambientes complexos. A fundamentação apresentada sustenta a necessidade de aprofundar, nas seções seguintes, como essa lógica pode ser aplicada à atualização dinâmica do risco na segurança de voo.

Diante da fundamentação apresentada, observa-se que a relação entre inferência bayesiana, segurança de voo e SMS exige uma abordagem capaz de articular conceitos estatísticos, princípios de gerenciamento de risco e práticas organizacionais de tomada de decisão. Como o objetivo deste artigo não é testar empiricamente um modelo matemático, mas construir uma interpretação conceitual sobre a atualização dinâmica do risco operacional, torna-se necessário explicitar o percurso metodológico adotado para selecionar, organizar e analisar as fontes utilizadas. Assim, a próxima seção apresenta a caracterização da pesquisa, os procedimentos de revisão conceitual e os eixos analíticos que orientam a discussão proposta.

### **3. METODOLOGIA**

Este artigo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza teórica, abordagem qualitativa e finalidade exploratória, desenvolvida por meio de revisão conceitual da literatura. A escolha desse desenho metodológico decorre do próprio objetivo do estudo: compreender como a lógica da inferência estatística bayesiana pode contribuir para a atualização dinâmica do risco operacional na segurança de voo. A pesquisa exploratória é adequada quando se busca proporcionar maior familiaridade com determinado problema, tornando-o mais explícito e favorecendo a construção de hipóteses ou interpretações iniciais (Gil, 2002, p. 41).

Não se pretende testar empiricamente um modelo estatístico. Também não se busca aplicar fórmulas bayesianas ou analisar uma base de dados operacional. A proposta é construir uma interpretação conceitual capaz de aproximar inferência bayesiana, gerenciamento do risco e Sistemas de Gerenciamento da Segurança Operacional.

A pesquisa é teórica porque se concentra na análise e articulação de conceitos já desenvolvidos na literatura sobre inferência bayesiana, segurança de voo, acidentes organizacionais, cultura justa, tomada de decisão sob incerteza e SMS. A pesquisa bibliográfica permite ao pesquisador entrar em contato com materiais já publicados sobre o tema, oferecendo base para compreender o estado do conhecimento e sustentar a análise proposta (Marconi; Lakatos, 2003, p. 183).

A abordagem qualitativa justifica-se porque o artigo não procura medir variáveis, quantificar ocorrências ou produzir estimativas

numéricas sobre acidentes e incidentes. O foco recai sobre a interpretação de conceitos, documentos técnicos e estudos acadêmicos. Creswell (2009, p. 4) define a pesquisa qualitativa como uma forma de explorar e compreender significados atribuídos a problemas sociais ou humanos, o que se ajusta à proposta de examinar como o risco operacional pode ser interpretado de maneira dinâmica no SMS.

Embora o artigo não desenvolva um modelo quantitativo aplicado, a escolha da inferência bayesiana como eixo conceitual exige apoio em literatura metodológica estatística compatível com o tema. Berry (1996, p. 1-3) apresenta a estatística bayesiana como uma abordagem inferencial baseada na atualização de probabilidades à luz de novas informações, o que permite compreender a incerteza como parte constitutiva do processo de análise. Essa perspectiva sustenta a utilização da lógica bayesiana neste artigo não como procedimento de cálculo, mas como fundamento metodológico para interpretar a revisão dinâmica da percepção de risco.

Quanto aos objetivos, a pesquisa possui caráter exploratório. Essa escolha se justifica porque a relação entre inferência bayesiana e segurança de voo ainda pode ser desenvolvida em nível conceitual, especialmente quando associada ao funcionamento prático do SMS. Embora existam aplicações técnicas de redes bayesianas na avaliação de acidentes e riscos aeronáuticos, este artigo não se limita à modelagem matemática. A discussão proposta examina a lógica de atualização bayesiana como uma forma de pensar o risco operacional.

Assim, o risco é tratado como uma estimativa revisável, e não como uma classificação estática ou definitiva. Essa delimitação é coerente

com a finalidade exploratória do estudo, pois permite investigar relações conceituais entre campos distintos sem a necessidade de validação empírica imediata (Gil, 2002, p. 41).

O universo da pesquisa foi composto por literatura acadêmica internacional, documentos técnicos e normativos sobre segurança operacional, inferência bayesiana, gerenciamento de riscos e tomada de decisão sob incerteza. A amostra bibliográfica foi selecionada de forma intencional. Consideraram-se a relevância teórica das fontes, sua aderência ao tema, sua contribuição para os eixos analíticos do artigo e sua capacidade de sustentar uma revisão conceitual.

Foram priorizadas obras clássicas, artigos científicos, manuais internacionais e estudos recentes. Essa seleção permitiu reunir autores fundamentais da inferência bayesiana, referências sobre segurança sistêmica e documentos técnicos ligados à implementação de SMS. A opção pela pesquisa bibliográfica é compatível com estudos que buscam examinar contribuições teóricas já disponíveis e reorganizá-las em torno de um problema específico de pesquisa (Marconi; Lakatos, 2003, p. 183).

As fontes selecionadas foram organizadas em quatro grupos. O primeiro reuniu referências sobre inferência bayesiana e raciocínio probabilístico. O segundo contemplou obras sobre segurança sistêmica, acidentes organizacionais, cultura justa e tomada de decisão em ambientes complexos. O terceiro incluiu documentos técnicos internacionais sobre SMS e gerenciamento do risco operacional. O quarto reuniu estudos aplicados ou contemporâneos relacionados à avaliação de risco, inteligência artificial, fatores humanos e segurança na aviação.

Os critérios de inclusão foram definidos a partir do problema de pesquisa. Foram incluídas fontes relacionadas à inferência bayesiana, segurança de voo, SMS, gerenciamento de risco ou tomada de decisão sob incerteza. Também foram consideradas a relevância acadêmica ou institucional da fonte, sua aplicabilidade conceitual e sua contribuição para compreender o risco operacional como estimativa dinâmica.

Documentos técnicos de organizações internacionais, como ICAO e FAA, foram incorporados em razão de sua importância para a estruturação normativa e operacional dos sistemas de segurança na aviação. Essas fontes foram utilizadas para delimitar o papel do SMS, os processos de gerenciamento do risco e a necessidade de decisões baseadas em evidências.

Foram excluídas fontes sem relação clara com o problema de pesquisa, materiais opinativos sem sustentação acadêmica, publicações jornalísticas, textos sem identificação de autoria ou instituição responsável e documentos excessivamente matemáticos que não apresentassem conexão com segurança operacional ou tomada de decisão. Essa delimitação foi necessária para preservar o foco conceitual do artigo.

O procedimento de coleta consistiu no levantamento, leitura e fichamento das fontes selecionadas. Durante essa etapa, foram identificados conceitos centrais, definições operacionais, relações entre autores, limitações apontadas pela literatura e possíveis aplicações ao SMS. O fichamento permitiu organizar as contribuições de cada obra segundo sua função no artigo.

Algumas fontes foram usadas para fundamentar a inferência bayesiana. Outras sustentaram a discussão sobre segurança sistêmica, gerenciamento de risco, cultura justa, indicadores e atualização dinâmica da percepção de risco. Essa organização favoreceu a construção de uma análise temática, adequada a uma investigação qualitativa voltada à interpretação de conceitos e relações teóricas (Creswell, 2009, p. 4).

A análise dos dados bibliográficos foi realizada por meio de interpretação temática. As fontes foram examinadas a partir de cinco eixos: segurança de voo como sistema complexo; SMS como estrutura de gerenciamento e aprendizagem; risco operacional como estimativa sujeita a revisão; inferência bayesiana como lógica de atualização; e integração entre evidências quantitativas, qualitativas e julgamento especializado.

Esses eixos orientaram a construção da discussão. A partir deles, buscou-se identificar convergências entre os fundamentos da inferência bayesiana e as necessidades práticas do gerenciamento da segurança operacional.

Não houve população humana, aplicação de questionários, entrevistas, experimentos, coleta de dados sensíveis ou análise de registros operacionais internos de organizações aeronáuticas. Por essa razão, o estudo não envolve amostragem de participantes nem tratamento estatístico de dados empíricos.

A amostragem mencionada neste artigo refere-se exclusivamente à seleção intencional de fontes bibliográficas e documentais. Trata-se, portanto, de uma amostra teórica, definida pela relevância das obras para responder ao problema de pesquisa. A seleção intencional é

coerente com a finalidade exploratória e conceitual do estudo, pois privilegia obras capazes de oferecer sustentação direta ao problema investigado (Gil, 2002, p. 41).

Quanto ao tratamento dos dados, as informações extraídas das fontes foram organizadas de forma qualitativa e argumentativa. Não foram elaboradas planilhas estatísticas, modelos matemáticos ou testes de hipótese. A análise consistiu na comparação conceitual entre os fundamentos da inferência bayesiana e as exigências do gerenciamento da segurança operacional.

A metodologia adotada apresenta limitações. Por se tratar de uma revisão conceitual, o artigo não comprova empiricamente a eficácia da inferência bayesiana em organizações aeronáuticas específicas. Também não propõe um algoritmo, uma rede bayesiana operacional ou um modelo quantitativo validado.

Com base nesse percurso metodológico, a seção seguinte organiza a discussão em aplicações conceituais da lógica bayesiana no SMS. O foco recai sobre situações práticas em que novas evidências podem alterar a percepção do risco operacional, como relatos voluntários, auditorias, treinamento, manutenção, eventos raros, indicadores de segurança e processos de apoio à decisão gerencial.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. A Lógica Bayesiana Aplicada à Segurança de Voo**

A aplicação conceitual da inferência bayesiana à segurança de voo permite compreender o risco operacional como uma percepção revisável. Em vez de tratar a classificação inicial de um perigo como definitiva, a organização passa a considerá-la como uma estimativa

sujeita à incorporação de novas evidências. Essa lógica é compatível com o funcionamento do SMS, pois o gerenciamento da segurança depende da identificação de perigos, da avaliação de riscos, do monitoramento de controles e da revisão contínua das decisões de segurança (ICAO, 2018, p. 2-19).

No plano estatístico, a estimativa inicial corresponde àquilo que a literatura bayesiana chama de probabilidade prévia. As evidências posteriores podem vir de relatos voluntários, auditorias, treinamento, manutenção, indicadores ou ocorrências operacionais. Quando essas evidências surgem, a organização precisa avaliar se elas tornam uma hipótese de risco mais plausível, menos plausível ou praticamente inalterada. Essa relação entre informação prévia, evidência observada e estimativa atualizada constitui um dos fundamentos da inferência bayesiana (Berry, 1996, p. 1-3).

Um exemplo didático ajuda a visualizar esse raciocínio. Suponha que uma organização estime inicialmente que a hipótese “determinado procedimento possui fragilidade operacional relevante” tenha probabilidade de 10%, isto é,  $P(H) = 0,10$ . Depois, surgem relatos recorrentes sobre dúvidas na execução desse procedimento. Caso a fragilidade realmente exista, a organização estima que a chance de observar esse tipo de relato seria de 70%, ou  $P(E|H) = 0,70$ . A probabilidade geral de observar esse conjunto de relatos, considerando outros cenários possíveis, é estimada em 20%, ou  $P(E) = 0,20$ . Com a atualização bayesiana,  $P(H|E) = [0,70 \times 0,10] / 0,20$ , chegando a  $P(H|E) = 0,35$ . Assim, a percepção de risco passa de 10% para 35% depois da nova evidência (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

O número, nesse caso, não deve ser lido como verdade absoluta. Ele funciona como apoio ao raciocínio. A contribuição mais relevante

está em tornar visível que a evidência modificou a plausibilidade da hipótese de risco. Isso evita dois problemas comuns: ignorar sinais fracos porque ainda não houve acidente ou, no extremo oposto, reagir de maneira desproporcional a qualquer informação isolada. Em sistemas complexos, condições latentes podem permanecer acumuladas antes da ocorrência de um evento adverso, razão pela qual a leitura preventiva do risco é essencial para a segurança de voo (Reason, 1997, p. 10-12).

## **4.2. Atualização do Risco Operacional a Partir de Relatos Voluntários**

Relatos voluntários têm valor especial para o SMS porque permitem que a organização observe aspectos da operação que nem sempre aparecem em indicadores formais. Muitas vezes, o primeiro sinal de fragilidade não surge como acidente, incidente grave ou não conformidade, mas como desconforto operacional, dúvida recorrente, adaptação informal ou dificuldade relatada por quem executa a atividade. A ICAO reconhece que informações de segurança provenientes de diferentes fontes devem apoiar a identificação de perigos e o gerenciamento de riscos (ICAO, 2018, p. 3-6).

Nesse contexto, a leitura bayesiana ajuda a evitar que o relato seja tratado apenas como registro administrativo. Imagine a hipótese “há ambiguidade relevante em determinado checklist”. Antes de receber novos relatos, a organização estima essa hipótese em 12%, ou  $P(H) = 0,12$ . Após certo período, surgem relatos voluntários semelhantes, todos apontando interpretações diferentes da mesma etapa. Se a ambiguidade realmente existir, a chance de observar esse padrão de relatos é estimada em 75%, ou  $P(E|H) = 0,75$ . A

probabilidade geral de observar relatos desse tipo, por diferentes causas, é estimada em 25%, ou  $P(E) = 0,25$ . A atualização resulta em  $P(H|E) = [0,75 \times 0,12] / 0,25 = 0,36$ . A percepção de risco associada à ambiguidade do checklist passa, portanto, de 12% para 36% (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

Esse resultado não significa que o checklist esteja necessariamente inadequado. Significa que a hipótese ficou mais plausível e merece tratamento gerencial. A resposta pode ser simples, como revisar a redação do procedimento, entrevistar usuários, observar a execução em linha ou incluir o tema em treinamento recorrente. O importante é que a decisão seja proporcional à força da evidência e ao potencial de consequência.

Há, porém, uma condição anterior a qualquer cálculo: a organização precisa receber relatos confiáveis. Quando os profissionais acreditam que serão punidos automaticamente, a tendência é reduzir a transparência do reporte. Dekker (2012, p. 33-35) afirma que a aprendizagem organizacional depende de uma cultura capaz de equilibrar responsabilidade e segurança psicológica. Portanto, em termos bayesianos, uma base de relatos subnotificada distorce a evidência disponível e pode levar o SMS a subestimar perigos relevantes.

### **4.3. Atualização do Risco Operacional Após Auditorias e Inspeções**

Auditorias e inspeções fornecem outro tipo de evidência. Enquanto relatos voluntários surgem da experiência cotidiana dos profissionais, auditorias e inspeções resultam de processos formais de verificação. Elas ajudam a identificar se barreiras, procedimentos

e controles estão funcionando conforme planejado. A FAA associa a garantia da segurança ao monitoramento de processos, avaliação de controles e identificação de mudanças que possam afetar o risco operacional (FAA, 2024, p. 4-1).

Em muitas organizações, o achado de auditoria é tratado como uma pendência que precisa ser encerrada. Essa visão é necessária, mas incompleta. Do ponto de vista do SMS, um achado também pode ser evidência sobre a robustez de uma barreira. Um erro isolado em um registro pode ser apenas uma falha pontual. Achados semelhantes, repetidos em áreas diferentes, já sugerem outra coisa: talvez o controle documental, o treinamento ou a supervisão não estejam funcionando como se imaginava.

Considere, por exemplo, a hipótese “o processo de controle documental possui fragilidade sistêmica”. Antes da auditoria, a organização estima  $P(H) = 0,10$ . Em auditorias sucessivas, surgem achados repetidos em setores diferentes, com registros incompletos e versões divergentes de documentos. Se houver fragilidade sistêmica, a probabilidade de observar esse padrão é estimada em  $P(E|H) = 0,80$ . A probabilidade geral de achados semelhantes, considerando outras causas, é  $P(E) = 0,32$ . O cálculo  $P(H|E) = [0,80 \times 0,10] / 0,32$  resulta em 0,25. A percepção de risco sobe de 10% para 25% (Berry, 1996, p. 1-3).

A mudança pode parecer moderada, mas já é suficiente para deslocar a análise. O problema deixa de ser apenas “corrigir documentos” e passa a ser “entender por que o sistema permite recorrência de documentos incorretos”. Leveson (2004, p. 246-248) sustenta que a segurança em sistemas complexos depende da adequação dos controles e restrições, e não apenas da correção de

falhas isoladas. Por isso, auditorias devem alimentar o raciocínio de risco, e não apenas o cumprimento formal de requisitos.

#### **4.4. Evidências Provenientes de Treinamento e Proficiência Operacional**

Treinamento e proficiência operacional ocupam posição privilegiada na atualização do risco porque permitem observar dificuldades em ambiente controlado. O simulador, as avaliações de linha, os treinamentos recorrentes e os cenários de tomada de decisão podem revelar vulnerabilidades antes que elas apareçam em uma ocorrência real. A FAA relaciona o SMS à identificação de perigos e à tomada de decisões informadas, o que inclui o uso de dados e informações provenientes das atividades organizacionais (FAA, 2024, p. 3-3).

A situação pode ser ilustrada com uma hipótese simples: “há deficiência de proficiência em determinado cenário operacional”. A estimativa inicial da organização é  $P(H) = 0,15$ . Durante sessões de simulador, avaliadores observam dificuldades semelhantes em tripulações diferentes. Caso a deficiência realmente exista, estima-se que a chance de observar essas dificuldades seja  $P(E|H) = 0,80$ . Considerando a frequência geral desse tipo de evidência em treinamentos, a organização estima  $P(E) = 0,30$ . Assim,  $P(H|E) = [0,80 \times 0,15] / 0,30 = 0,40$ . A percepção de risco aumenta de 15% para 40% (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

Esse tipo de resultado muda a forma de interpretar o treinamento. O dado deixa de ser apenas uma medida de desempenho individual e passa a ser evidência sobre o sistema. Se várias tripulações erram no mesmo ponto, talvez o problema esteja no desenho do

procedimento, na clareza do material didático, no tempo de exposição ao cenário ou nas pressões do contexto operacional. Casale et al. (2026, p. 1-3) destacam, em análise sobre acidentes de helicóptero em condições meteorológicas adversas, fatores como pressão organizacional, treinamento inadequado, supervisão insuficiente, fadiga e percepção deficiente de risco.

A reflexão que emerge é prática. O SMS não precisa aguardar uma ocorrência real para agir quando o treinamento aponta padrão de fragilidade. A atualização do risco pode justificar reforço de cenário em simulador, alteração de currículo, revisão de briefing operacional ou acompanhamento por frota, base ou tipo de missão. Assim, o treinamento passa a ser também um instrumento preditivo de segurança, e não apenas um requisito de qualificação (ICAO, 2018, p. 4-3).

#### **4.5. Evidências Provenientes da Manutenção e da Confiabilidade Técnica**

A manutenção produz sinais que, muitas vezes, antecedem a percepção operacional de risco. Falhas intermitentes, panes repetidas, remoções não programadas, discrepâncias recorrentes e degradação de confiabilidade podem indicar que determinado sistema técnico exige atenção antes de gerar uma ocorrência de maior severidade. No SMS, essas informações devem ser conectadas ao gerenciamento do risco, pois o controle de perigos envolve monitoramento de condições e revisão da eficácia das barreiras existentes (ICAO, 2018, p. 2-19).

Um exemplo hipotético ajuda a mostrar a diferença entre tratar registros técnicos como eventos isolados e tratá-los como evidências

acumuladas. Suponha que a hipótese seja “há degradação técnica relevante em determinado sistema”, com  $P(H) = 0,08$ . Depois de certo período, aparecem registros repetidos de falhas intermitentes. Se a degradação realmente existir, a chance de observar esse padrão é estimada em  $P(E|H) = 0,60$ . A probabilidade geral de observar esse conjunto de falhas, considerando o histórico do sistema, é  $P(E) = 0,16$ . A atualização  $P(H|E) = [0,60 \times 0,08] / 0,16$  resulta em 0,30. A percepção de risco sobe de 8% para 30% (Berry, 1996, p. 1-3).

Esse aumento não prova que o sistema esteja degradado. A inferência bayesiana não substitui investigação técnica, engenharia de manutenção ou critérios de aeronavegabilidade. O que ela oferece é um modo organizado de dizer que a hipótese ficou mais plausível e que ignorar a evidência seria imprudente. Pearl (1988, p. 29-32) apresenta o raciocínio probabilístico como forma de representar relações plausíveis em ambientes incertos, o que se ajusta a situações nas quais evidências técnicas ainda não são conclusivas.

Na prática, a resposta do SMS pode envolver inspeção adicional, acompanhamento de confiabilidade, revisão de critérios de despacho ou cruzamento dos dados de manutenção com relatos de tripulação. Essa integração é relevante porque condições latentes podem permanecer no sistema até se combinarem com fatores operacionais, humanos ou organizacionais (Reason, 1997, p. 10-12).

#### **4.6. Eventos Raros e Limitações da Frequência Histórica**

A aviação apresenta um desafio estatístico importante: os eventos graves são raros. Isso é positivo do ponto de vista da segurança, mas cria dificuldade para estimar riscos apenas por frequência histórica.

Uma leitura exclusivamente frequentista pode levar à falsa sensação de segurança quando poucos eventos aparecem na base de dados. Reason (1997, p. 10-12) observa que condições latentes podem permanecer presentes no sistema antes de se manifestarem em acidentes.

A frequência histórica continua sendo útil. Se determinado evento ocorreu uma vez em 10.000 operações, a frequência relativa simples seria  $1 / 10.000 = 0,0001$ , ou 0,01%. Essa informação ajuda a entender o histórico, mas não encerra a análise. O problema surge quando a organização conclui que o risco é baixo apenas porque a ocorrência grave é rara. Em sistemas complexos, sinais de deterioração podem aparecer antes do evento final (Leveson, 2004, p. 237).

Suponha que a hipótese seja “o risco desse cenário aumentou devido à degradação de barreiras”, com  $P(H) = 0,05$ . Surgem, então, relatos, achados de auditoria e dificuldades de treinamento associados ao mesmo cenário. Se essa degradação realmente existir, a organização estima  $P(E|H) = 0,65$ . A probabilidade geral de observar esse conjunto de sinais é  $P(E) = 0,13$ . O cálculo  $P(H|E) = [0,65 \times 0,05] / 0,13$  resulta em 0,25. A percepção de risco passa de 5% para 25%, mesmo sem aumento expressivo de eventos graves (Berry, 1996, p. 1-3).

O exemplo mostra por que a lógica bayesiana é útil para perigos de alta severidade e baixa frequência. Ela permite que o SMS leve em conta evidências indiretas, sem abandonar o histórico disponível. Zhang e Mahadevan (2021, p. 1) demonstram a aplicação de redes bayesianas na análise de relatórios de acidentes aeronáuticos, justamente porque a segurança de voo envolve relações entre múltiplos fatores, dependências causais e incertezas.

## 4.7. Integração Entre Dados Quantitativos e Evidências Qualitativas

A segurança de voo raramente depende de uma única fonte de informação. Um indicador pode apontar pequena mudança numérica; um relato pode oferecer o contexto; uma auditoria pode indicar fragilidade de controle; um treinamento pode revelar dificuldade de execução. Separadas, essas evidências podem parecer insuficientes. Juntas, podem modificar a percepção de risco. A ICAO trata indicadores e informações de segurança como elementos necessários ao monitoramento e à gestão do desempenho da segurança operacional (ICAO, 2018, p. 4-3).

Considere a hipótese “há aumento de instabilidade em determinada fase de voo”. A organização estima inicialmente  $P(H) = 0,10$ . Um indicador quantitativo mostra leve aumento de desvios de parâmetro, enquanto relatos qualitativos indicam dificuldade de estabilização em condições específicas. Se a hipótese for verdadeira, a chance de observar simultaneamente o aumento do indicador e os relatos é estimada em  $P(E|H) = 0,70$ . A probabilidade geral de observar essa combinação é  $P(E) = 0,28$ . Assim,  $P(H|E) = [0,70 \times 0,10] / 0,28 = 0,25$ . A percepção de risco passa de 10% para 25% (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

O ponto mais interessante desse exemplo é que nenhuma evidência, isoladamente, precisaria ser conclusiva. A leve alteração no indicador talvez fosse insuficiente para ação imediata. Os relatos, sozinhos, talvez fossem considerados subjetivos. A combinação dos dois sinais, porém, torna a hipótese de risco mais plausível. Pearl (1988, p. 29-32) mostra que o raciocínio probabilístico permite

representar relações entre evidências e hipóteses em ambientes incertos.

Por isso, o SMS deve funcionar como uma estrutura de convergência. A pergunta decisiva não é apenas se um indicador ultrapassou determinado limite, mas se diferentes sinais começam a apontar para a mesma hipótese operacional. Essa forma de raciocínio evita que dados quantitativos e qualitativos sejam tratados como mundos separados, aproximando o gerenciamento da segurança de uma interpretação mais realista da operação (ICAO, 2018, p. 2-19).

#### **4.8. Apoio à Decisão Gerencial no SMS**

A atualização da percepção de risco tem mais valor puder orientar uma decisão de gestão. No SMS, a evidência deve levar a alguma forma de escolha: manter sob monitoramento, mitigar, revisar procedimento, ampliar treinamento, abrir auditoria dirigida ou modificar barreiras. A FAA destaca que o SMS deve apoiar decisões efetivas e informadas sobre segurança, conectando identificação de perigos, gerenciamento de risco e garantia da segurança (FAA, 2024, p. i).

Imagine um perigo inicialmente classificado como tolerável, com  $P(H) = 0,18$ . Após relatos e auditorias, a organização chega a uma percepção posterior de  $P(H|E) = 0,42$ . Esse número não decide sozinho. Ele precisa ser interpretado diante da severidade potencial, da exposição operacional e dos critérios internos de aceitabilidade. Se a organização definiu que riscos acima de 40% exigem mitigação ativa, a atualização muda a decisão: o perigo deixa de ser apenas

monitorado e passa a exigir ação concreta, como revisão de procedimento ou treinamento direcionado (ICAO, 2018, p. 2-21).

A utilidade da abordagem bayesiana está na rastreabilidade. A organização consegue explicar que havia uma percepção inicial, que surgiram novas evidências, que essas evidências alteraram a estimativa e que a decisão foi ajustada em consequência disso. Esse encadeamento reduz a chance de decisões baseadas apenas em impressão, urgência momentânea ou pressão hierárquica (FAA, 2024, p. 4-1).

Em termos práticos, a inferência bayesiana não substitui o julgamento gerencial. Ela disciplina esse julgamento. Leveson (2004, p. 250) destaca que sistemas complexos exigem atenção aos controles, interações e processos decisórios. Assim, o valor da atualização bayesiana está em obrigar a organização a justificar por que uma evidência muda, ou não muda, uma prioridade de segurança.

#### **4.9. Ciclo Conceitual Bayesiano para Atualização do Risco Operacional**

A discussão anterior permite propor um ciclo conceitual para o SMS. O ciclo começa com uma estimativa inicial do risco, baseada em histórico, matriz de risco, experiência operacional e julgamento técnico. Em seguida, novas evidências são incorporadas. Depois, a organização avalia se essas evidências tornam a hipótese de risco mais plausível. Por fim, a percepção de risco é revisada e convertida em decisão de segurança. Esse encadeamento é compatível com a melhoria contínua e com o monitoramento do desempenho da segurança operacional (ICAO, 2018, p. 9-3).

Um ciclo hipotético pode ser descrito da seguinte forma. A organização avalia a hipótese “o risco associado a determinada operação especial está subestimado” e define  $P(H) = 0,20$ . Depois, aparecem três evidências convergentes: relatos voluntários, achados de auditoria e desempenho abaixo do esperado em treinamento. Se a hipótese for verdadeira, a chance de observar esse conjunto de evidências é estimada em  $P(E|H) = 0,75$ . A probabilidade geral de observar esse conjunto de sinais é  $P(E) = 0,30$ . A atualização  $P(H|E) = [0,75 \times 0,20] / 0,30$  resulta em 0,50. A percepção de risco passa de 20% para 50% (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

A partir desse ponto, o SMS precisa agir. A ação pode ser mitigação imediata, revisão de procedimento, nova avaliação de risco, treinamento dirigido ou monitoramento ampliado. A decisão depende do contexto, da severidade potencial e da capacidade de controle da organização. O elemento essencial é que a mudança de 20% para 50% seja documentada como resultado de evidências específicas, e não como mera impressão gerencial (Berry, 1996, p. 1-3).

Esse ciclo também ajuda a evitar extremos. De um lado, evita a rigidez de matrizes que permanecem inalteradas apesar de novas evidências. De outro, reduz a reação impulsiva a sinais isolados. A lógica bayesiana sugere uma postura intermediária: atualizar a percepção de risco conforme a força, a recorrência e a coerência das evidências disponíveis (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

#### **4.10. Vantagens da Abordagem Bayesiana para a Segurança de Voo**

A abordagem bayesiana apresenta vantagens relevantes para a segurança de voo, mas sua principal virtude talvez seja menos matemática do que organizacional. Ela obriga o SMS a reconhecer que toda avaliação de risco é provisória. Essa postura é importante porque muitas decisões precisam ser tomadas com informação incompleta, especialmente quando se trata de perigos raros, sinais fracos ou mudanças recentes no ambiente operacional (Berry, 1996, p.1-3).

Um exemplo mostra como a resposta pode ser graduada. Suponha que a hipótese seja “determinada barreira operacional perdeu efetividade”, com  $P(H) = 0,25$ . Surge uma evidência fraca, com  $P(E|H) = 0,40$  e  $P(E) = 0,35$ . A atualização resulta em  $P(H|E) = [0,40 \times 0,25] / 0,35 = 0,2857$ , aproximadamente 29%. A percepção aumenta pouco, o que talvez justifique apenas monitoramento. Mais tarde, aparece evidência mais forte, com  $P(E|H) = 0,80$  e  $P(E) = 0,40$ . Usando a percepção aproximada de 29% como nova estimativa inicial, obtém-se  $P(H|E) = [0,80 \times 0,29] / 0,40 = 0,58$ . Agora, a percepção chega a 58%, podendo justificar mitigação ativa (Gelman et al., 2013, p. 6-8).

Esse exemplo mostra que a abordagem bayesiana permite melhor calibrar a resposta. Nem toda evidência exige mudança drástica. Nem toda ausência de acidente justifica inércia. Entre a negligência e o alarmismo, existe um espaço de decisão mais proporcional, no qual a organização ajusta suas ações conforme a força das informações disponíveis.

Outra vantagem está na integração entre conhecimento especializado e dados operacionais. O julgamento de especialistas pode ser usado como estimativa inicial, desde que documentado e submetido à revisão diante de novas evidências. Essa característica é

útil em segurança de voo porque muitos perigos relevantes não possuem histórico estatístico abundante, mas são reconhecidos por profissionais experientes antes de aparecerem em grande volume de dados (ICAO, 2018, p. 4-3).

## **5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente artigo analisa a inferência estatística bayesiana como estrutura conceitual aplicável à segurança de voo, com foco na atualização dinâmica do risco operacional no âmbito dos Sistemas de Gerenciamento da Segurança Operacional. O problema de pesquisa é respondido ao se demonstrar que a abordagem bayesiana contribui para o SMS ao permitir que a percepção inicial de risco seja revista diante de novas evidências, em vez de permanecer limitada a classificações estáticas, retrospectivas ou excessivamente dependentes da frequência histórica de eventos.

O objetivo geral é atingido, pois o estudo apresenta uma interpretação conceitual da inferência bayesiana como apoio à revisão contínua do risco operacional. A análise demonstra que relatos voluntários, auditorias, treinamentos, registros de manutenção, indicadores operacionais e julgamento especializado podem funcionar como evidências capazes de modificar a percepção de risco dentro do SMS.

Os objetivos específicos também são alcançados. O artigo explica os fundamentos conceituais da inferência bayesiana, diferencia sua lógica da leitura frequentista simples, relaciona a abordagem bayesiana à tomada de decisão sob incerteza, identifica aplicações possíveis no SMS e discute sua utilidade para eventos raros, sinais fracos e evidências incompletas.

A hipótese central do artigo é confirmada. A inferência bayesiana oferece uma lógica útil para apoiar a transição de modelos predominantemente retrospectivos para abordagens mais adaptativas, proativas e preditivas de segurança de voo. Essa contribuição é especialmente relevante em ambientes nos quais a baixa frequência de acidentes não elimina a presença de perigos latentes.

A principal contribuição teórica do estudo está em aproximar inferência bayesiana, segurança sistêmica e gerenciamento do risco operacional. Essa aproximação permite compreender o risco não como uma categoria fixa, mas como uma estimativa provisória, sensível à entrada de novas informações e dependente da qualidade das evidências disponíveis.

A principal contribuição prática está na proposição de uma forma mais disciplinada de raciocínio para o SMS. A organização pode registrar a percepção inicial do risco, identificar evidências novas, avaliar sua relevância, revisar a percepção anterior e justificar a decisão adotada. Com isso, a gestão da segurança torna-se mais transparente, rastreável e proporcional à incerteza operacional.

O estudo também evidencia que a qualidade da inferência depende diretamente da qualidade dos dados disponíveis. Sistemas de *safety* precisam ampliar não apenas a quantidade de dados coletados, mas também sua variedade, confiabilidade, atualidade e capacidade de representar diferentes dimensões da operação. Relatos voluntários, auditorias, dados de treinamento, registros de manutenção, indicadores operacionais, investigações internas e observações de campo tornam-se mais úteis quando são integrados, padronizados, rastreáveis e analisados de forma sistemática.

A análise reforça a importância da estatística para a formação e a prática em segurança de voo. O estudo estatístico permite que profissionais de *aviation safety* interpretem incertezas, reconheçam limitações dos dados, diferenciem frequência observada de risco estimado e compreendam como evidências novas podem alterar decisões. Em ambientes operacionais complexos, a estatística não atua apenas como ferramenta matemática, mas como linguagem de raciocínio para apoiar decisões de segurança.

O estudo apresenta limitações. A abordagem bayesiana depende da qualidade da estimativa inicial, da confiabilidade das evidências e da transparência dos critérios usados para atualizar a percepção de risco. Uma estimativa prévia arbitrária, relatos subnotificados, auditorias superficiais ou indicadores mal definidos podem produzir falsa sensação de precisão.

Também se reconhece a necessidade de análise de sensibilidade, pois diferentes estimativas iniciais podem conduzir a percepções posteriores distintas e influenciar decisões de segurança. Essa limitação exige que aplicações bayesianas em SMS sejam acompanhadas de documentação, justificativa técnica, comparação de cenários e revisão crítica das premissas adotadas.

Outro cuidado está no risco de utilizar a linguagem bayesiana apenas como aparência técnica. Termos como probabilidade prévia, evidência, verossimilhança e estimativa posterior não garantem, por si só, uma decisão segura. A utilidade da abordagem depende da documentação do raciocínio, da análise crítica das evidências e da conexão entre atualização do risco e decisão gerencial.

Conclui-se que a inferência estatística bayesiana não substitui os processos formais do SMS, o julgamento profissional ou os indicadores tradicionais de segurança. Sua contribuição está em organizar a forma como esses elementos são combinados diante da incerteza. Quando aplicada de modo mais transparente e criterioso, a lógica bayesiana fortalece a capacidade do SMS de aprender com evidências emergentes, revisar prioridades e gerar decisões mais assertivas na segurança de voo.

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se desenvolver estudos empíricos com dados reais de SMS, simulando modelos bayesianos aplicados a relatos voluntários, auditorias, treinamento, manutenção e indicadores de desempenho. Também se recomenda investigar métodos de calibração das estimativas iniciais e formas de integrar julgamento especializado, dados quantitativos e evidências qualitativas em modelos de apoio à decisão para a segurança de voo.

Sugere-se, ainda, que estudos futuros comparem a inferência bayesiana com outros modelos estatísticos aplicáveis à segurança operacional, como regressão logística, modelos de sobrevivência, séries temporais, modelos hierárquicos, análise multivariada, modelos de classificação, árvores de decisão, modelos preditivos e técnicas de aprendizado estatístico. Essa ampliação pode contribuir para identificar quais métodos são mais adequados a diferentes tipos de dados, perigos, operações e decisões dentro do SMS.

Por fim, este artigo convida engenheiros, gestores, pilotos, analistas de segurança e demais profissionais de *safety* a refletirem sobre novas possibilidades de reavaliação contínua do risco operacional a partir do uso inteligente de dados. O avanço de sistemas digitais, bancos de dados operacionais, *big data*, indicadores-chave de

desempenho, métricas de treinamento, registros de manutenção e informações provenientes do SMS amplia a capacidade de observar sinais que antes permaneciam dispersos. Nesse cenário, a estatística assume papel estratégico, pois permite transformar dados em evidências, evidências em inferência e inferência em decisão. A segurança de voo tende a se fortalecer quando a organização não apenas coleta informações, mas aprende continuamente com elas, revisa suas premissas e reconhece que cada novo dado pode ser uma oportunidade de compreender melhor o risco antes que ele se manifeste em evento adverso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERRY, Donald A. **Statistics: a Bayesian perspective**. Belmont: Duxbury Press, 1996.

CASALE, Douglas Estevam; SILVA, Rafaela Campos da; AMBROSIO, Dante Ricardo; DRAGO, Mirian Kelly Miranda; CARDOSO JÚNIOR, Moacyr Machado; COSTA, Luís Eduardo Vergueiro Loures da. Organizational pressure and pilot decision-making in adverse weather: a naturalistic decision-making analysis of helicopter accidents. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 18, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1590/jatm.v18.1428>. Disponível em: <https://jatm.com.br/jatm/article/view/1428>. Acesso em: 11 maio 2026.

CRESWELL, John W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2009. Disponível em: [https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog\\_609332/objava\\_105202/fajlovi/Creswell.pdf](https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_609332/objava_105202/fajlovi/Creswell.pdf). Acesso em: 9 jan. 2026.

DEKKER, Sidney. **Just culture: balancing safety and accountability**. 2. ed. Farnham: Ashgate, 2012.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Advisory Circular AC 120-92D: Safety Management Systems for Aviation Service Providers**. Washington, DC: FAA, 2024. Disponível em: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_120-92D\\_FAA\\_Web.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_120-92D_FAA_Web.pdf). Acesso em: 28 jan. 2026.

GELMAN, Andrew; CARLIN, John B.; STERN, Hal S.; DUNSON, David B.; VEHTARI, Aki; RUBIN, Donald B. **Bayesian data analysis**. 3. ed. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2013. Disponível em: <https://sites.stat.columbia.edu/gelman/book/BDA3.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2026.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Safety Management Manual: Doc 9859**. 4. ed. Montréal: ICAO, 2018. Disponível em: <https://www.icao.int/safety-management/SMI/SMM>. Acesso em: 22 fev. 2026.

LEVESON, Nancy G. A new accident model for engineering safer systems. **Safety Science**, Amsterdam, v. 42, n. 4, p. 237-270, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092575350300047X>. Acesso em: 4 mar. 2026.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

PEARL, Judea. **Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference.** San Mateo: Morgan Kaufmann, 1988. Disponível em: <https://theswissbay.ch/pdf/Gentoomen%20Library/Artificial%20Intelligence/Bayesian%20networks/Judea%20Pearl%20-%20Probabilistic%20Reasoning%20in%20Intelligent%20Systems.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2026.

REASON, James. **Managing the risks of organizational accidents.** Aldershot: Ashgate, 1997.

RODRIGUES, Raul Bonadia; CREEN, Cory Michael. Artificial intelligence-enabled risk forecasting in air traffic control: an interpretable machine-learning framework for safety management. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 18, 2026. Disponível em: <https://jatm.com.br/jatm/article/view/1437>. Acesso em: 24 abr. 2026.

ZHANG, Xiaoge; MAHADEVAN, Sankaran. Bayesian network modeling of accident investigation reports for aviation safety assessment. **Reliability Engineering and System Safety**, Amsterdam, v. 209, 107371, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107371>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832020308607>. Acesso em: 11 maio 2026.

---

<sup>1</sup> Pesquisador independente em Aviação Civil, Bacharel em Ciências Aeronáuticas pela Universidade Veiga de Almeida (UVA) e Mestre em Engenharia Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Atua nas áreas de segurança de aviação, regulação aeronáutica, manutenção de aeronaves, fatores humanos

e metodologia da pesquisa científica. É Auditor Líder IRCA ISO 9001, Facilitador de CRM pela ANAC e Primeiro Oficial em linha aérea regular, atuando na frota Boeing 737 NG e MAX. Foi Instrutor de Voo (INVA) e possui experiência em aerolevanteamento geofísico, manutenção de aeronaves e táxi aéreo. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1013-3310>. Google Scholar: <https://scholar.google.com.br/citations?user=az-j5h0AAAAJ>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)