XXII SITRAER 2025
Simpósio de Transporte Aéreo

ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DE RISCO POR INTERFERÊNCIA A LASER NAS FASES CRÍTICAS DO VOO

Fábio Silva de Assis Júnior, Amanda Vitoria de Castro Santos, Nathan Erick Correa dos Santos Souza, Michelle Carvalho Galvão da Silva Pinto Bandeira
Laboratório de Inteligência e Inovação em Transportes (LIIT)
Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), Universidade Federal de Goiás (UFG)

*** Corresponding author e-mail address**: michelle.galvao@ufg.br

PAPER ID: SIT1241251

ABSTRACT

The deliberate emission of laser beams towards commercial aircraft poses an emerging threat to operational safety, particularly during critical phases of flight. This study investigates the consequences associated with laser exposure through probabilistic modeling using Bayesian Networks (BN), based on 394 validated reports from CENIPA (2020–2024). Five operational risk scenarios were defined—incorporating variables such as laser color, exposure time, flight phase, location, and the occurrence of evasive maneuvers—and compared to a baseline scenario with no evidence. Results indicate that the conditional probability of an evasive maneuver, given an exposure event, is 4.63%. When combined with the average exposure rate of 2.28×10^{-4} per flight, an estimated 18 evasive maneuvers are expected to occur annually in Brazil. Analyses revealed that green laser exposure during night-time landing and takeoff is associated with increased probabilities of distraction, glare, and combined visual symptoms. The study also finds that although evasive maneuvers mitigate rare visual effects, they do not eliminate operational risks. Finally, this study highlights Brazil's regulatory gap and reinforces the urgent need for normative protocols to mitigate laser-related threats.

Keywords: Operational safety, Laser, Flight Phases, Bayesian Networks, Evasive Maneuver.

GENERATIVE AI USAGE STATEMENT

The authors declare that the use of generative AI tools was restricted to technical support activities, without compromising the originality, analysis, and conclusions presented in the work. All information obtained through these resources was carefully evaluated and integrated into the study, ensuring methodological rigor and academic integrity. Tool Elicit Research, Plus version, was used for automated research, enhancing the search for references related to the study topics.

PAPER ID: SIT1241251

ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DE RISCO POR INTERFERÊNCIA A LASER NAS FASES CRÍTICAS DO VOO

1 INTRODUÇÃO

A aviação comercial opera sob rígidos padrões de segurança operacional, sobretudo nas fases críticas de aproximação final e pouso, em que a carga cognitiva dos pilotos é elevada e a margem para erro, reduzida. Nesse contexto, a emissão intencional de feixes de radiação laser contra aeronaves tem emergido como um vetor relevante de risco à integridade das operações aéreas.

Incidentes envolvendo interferência luminosa concentram-se predominantemente em áreas próximas a aeródromos, durante operações noturnas e em altura inferior a 2.000 pés — condições que favorecem a dispersão angular do feixe sobre o pára-brisa da cabine, amplificando o risco de comprometimento visual (DeMik et al., 2013). A *Federal Aviation Administration* registrou, apenas em 2023, mais de 13 mil relatos de interferência com laser em voo (FAA, 2024). No Brasil, o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) documentou centenas de ocorrências entre 2020 e 2024, com predominância entre 19h e 0h e nos finais de semana.

A literatura técnica destaca que emissores de laser com comprimentos de onda entre 405 nm e 655 nm — especialmente os de 532 nm (verde) — são capazes de provocar degradações visuais severas, como comprometimento da acuidade, distorções de contraste e perda temporária da consciência situacional (Nakagawara et al., 2004; Gosling, O'Hagan e Quhill, 2016; Reidenbach, 2011). Esses efeitos podem induzir reações operacionais de alto risco, como transferência de controle, ativação antecipada do piloto automático ou manobras evasivas não planejadas.

Apesar da existência de recomendações internacionais, como a delimitação de zonas de exclusão luminosa (ICAO, 2010), o uso de filtros ópticos (FAA, 2022) e penalidades legais (CASA, 2023; UK CAA, 2011; Transport Canada, 2020), a persistência dos ataques evidencia descompasso entre os avanços normativos e a efetividade das ações de mitigação. No Brasil, o Art.261 do Código Penal já tipifica como crime a exposição de aeronaves a perigo, mas sua aplicação prática enfrenta desafios operacionais, como baixa rastreabilidade dos emissores e dificuldades de flagrante.

Diante desse cenário, o presente estudo tem por objetivo investigar as ocorrências registradas de interferência laser contra aeronaves no espaço aéreo brasileiro, com ênfase na fase de aproximação e pouso. Para isso, propõe-se o uso de modelagem probabilística por meio de Redes Bayesianas, com vistas a identificar padrões causais, estimar probabilidades condicionais e subsidiar estratégias preventivas baseadas em evidências técnico-operacionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A avaliação científica da interferência por radiação a laser em aeronaves demanda a seguinte abordagem conceitual: (i) os impactos adversos e cognitivos da exposição luminosa sobre o desempenho visual dos pilotos; (ii) as vulnerabilidades operacionais associadas a perfis críticos de voo; e (iii) o panorama normativo e institucional que regula — ou negligencia — a emissão indevida de feixes ópticos no espaço aéreo.

2.1 Efeitos da Irradiação Laser sobre o Desempenho Visual e Cognitivo de Pilotos

A percepção visual constitui o principal canal sensório-motor de controle durante as fases críticas do voo, como aproximação final e pouso. A exposição à radiação laser, especialmente em comprimentos de onda entre 532 nm (verde) e 633 nm (vermelho), pode desencadear uma série de efeitos adversos à visão, tais como *flash blindness* (cegueira momentânea), *glare* (ofuscamento), *afterimages* (imagens residuais) e *scotomas* (zonas cegas), com duração variável entre segundos e

minutos, dependendo da intensidade e da distância da fonte emissora (Nakagawara et al., 2004; Młyńczak, 2022).

Em experimentos conduzidos em simuladores de voo de alta fidelidade (nível C), Nakagawara et al. (2004) observaram que exposições a radiação visível entre 0 e 50 μW/cm² comprometeram significativamente o desempenho operacional de 34 pilotos, com aumento de 400% na taxa de aproximações arremetidas em cenários de iluminação simulada com 50 μW/cm². Mesmo com intensidades tão baixas quanto 0,5 μW/cm², 67% dos pilotos relataram efeitos adversos à visão. Já Reidenbach (2011), em estudo conduzido com pilotos expostos a laser verde, quantificou um aumento entre 2,5 e 9,9 segundos no tempo de busca visual, além de gravidade subjetiva média de 3,16 em escala de 1 a 5.

Em operações noturnas, a sensibilidade ao laser torna-se ainda mais crítica. Testes empíricos com aeronaves leves (como o DA-20), em condições reais de voo, demonstraram que emissores portáteis com potência de até 10 mW podem gerar iluminâncias superiores a 70.000 lux a 20 metros — valor consideravelmente acima do limiar aceitável para operações seguras à noite (Wawrzyński et al., 2022). Além dos efeitos visuais transitórios, há relatos documentados de impactos orgânicos mais severos. Em um caso clínico descrito por Gosling, O'Hagan e Quhill (2016), um piloto de aeronave comercial sofreu lesão retiniana focal compatível com queimadura por laser azul de alta potência durante aproximação a 1.300 pés, evidenciando que, embora raros, os riscos estruturais à visão são tecnicamente plausíveis.

O risco associado à exposição à radiação laser também pode ser avaliado por meio de métricas como a *Nominal Ocular Hazard Distance* (NOHD), a *Startle Zone Exposure Distance* (SZED), a *Critical Zone Exposure Distance* (CZED) e a *Laser Free Exposure Distance* (LFED) — parâmetros desenvolvidos por Młyńczak (2022) para modelar zonas de risco operacional. Para ponteiras de 10 mW a 532 nm, o CZED pode atingir 320,4 m, enquanto o LFED ultrapassa 3.200 m, abrangendo distâncias compatíveis com a trajetória de aproximação visual em aeródromos urbanos.

2.2 Vulnerabilidades Operacionais associadas a Perfis Críticos de Voo

As fases finais do voo — especialmente a aproximação final — constituem o momento de maior vulnerabilidade operacional frente à interferência por laser. Esse estágio exige elevada carga cognitiva dos pilotos, controle manual fino da aeronave e constante comunicação com o controle de tráfego aéreo, tornando-se particularmente sensível a estímulos visuais externos abruptos.

Estudos indicam que a maioria das ocorrências de ataques com laser ocorre entre 19h e 0h, período em que a sensibilidade visual noturna está em pico e a pupila encontra-se dilatada, ampliando o potencial de desorientação causada por feixes intensos (DeMik et al., 2013; FAA, 2022). Além disso, aeronaves em configuração de pouso operam com iluminação reduzida na cabine e menor velocidade, o que aumenta o tempo de exposição à fonte luminosa. A altura inferior a 2.000 pés, favorece o impacto angular do feixe sobre o pára-brisa, com elevada dispersão e reflexos internos, dificultando a leitura de instrumentos e a avaliação da rampa de descida.

Cenários agravantes incluem aproximações em ambientes urbanos densamente povoados, com múltiplos pontos de acesso terrestre à zona de aproximação final. Relatórios do FAA apontam que mais de 70% das ocorrências se concentram nos últimos 5 minutos de voo antes do toque, em vetores finais de aproximação direta (FAA, 2022). Em tais contextos, as respostas dos tripulantes variam entre a ativação imediata do piloto automático, a transferência de controle entre piloto e copiloto, e, em situações extremas, a realização de manobras evasivas que podem comprometer a estabilidade da aproximação.

No Brasil, análises do CENIPA revelam padrão semelhante. A maioria dos ataques registrados ocorreu em aproximações noturnas de voos regulares em terminais de grande porte, como São Paulo, Brasília e Recife, especialmente em fins de semana. Tais dados evidenciam a necessidade de medidas estruturadas de prevenção em áreas críticas do espaço aéreo terminal (CENIPA, 2023; ANAC/CENIPA, 2024). Adicionalmente, o tipo de aeronave e o perfil de operação influenciam

diretamente o grau de exposição e risco. Aeronaves de pequeno porte, voando abaixo do cone de proteção de espaço aéreo controlado, são mais suscetíveis a ataques não detectados. Por outro lado, voos comerciais regulares, embora mais monitorados, enfrentam maior exposição por conta da previsibilidade de rotas e horários.

Dessa forma, compreender as vulnerabilidades operacionais associadas aos perfis de voo em fase final de aproximação é essencial para o delineamento de estratégias de mitigação mais eficazes, com foco na integração de medidas regulatórias, operacionais e educacionais.

2.3 Contexto Normativo e Lacunas na Regulação da Interferência por Laser

A emissão de feixes laser contra aeronaves é considerada crime no Brasil, tipificada pelo Art. 261 do Código Penal, com pena de dois a cinco anos de reclusão (BRASIL, 1940). Apontar laser para aeronaves é culturamente entendido como um entretenimento, bem como o uso de balões juninos perto dos aeroportos (Castro et al., 2025). Contudo, faltam normas técnicas da ANAC e DECEA que estabeleçam zonas de exclusão, limites de potência ou diretrizes operacionais específicas.

O CENIPA, em conjunto com o DECEA, reconhece a interferência laser como um risco operacional relevante em seu "Guia Orientativo sobre Riscos Externos à Aviação" (ANAC/CENIPA, 2024), destacando a necessidade de comunicação entre autoridades aeronáuticas e de segurança pública. Em setembro de 2023, tais incidentes passaram a ser registrados no Portal Único de Notificação, embora ainda sem campos padronizados para aspectos como tempo de exposição, cor do feixe ou resposta do piloto (CENIPA, 2023). Em contraste, o Canadá implementou medidas mais técnicas e abrangentes. O Interim Order No. 2 Respecting Battery-powered Hand-held Lasers, publicado em junho de 2019 na *Canada Gazette*, regula a proibição de dispositivos portáteis com potência acima de 1 mW dentro de um raio de 10 km de aeroportos ou heliportos certificados, ou em regiões metropolitanas como Toronto, Montréal e Vancouver (Transport Canada, 2020). A ordem prevê penalidades financeiras imediatas — até CAD 5.000 para indivíduos e CAD 25.000 para corporações — sendo a exposição intencional de laser à aeronave passível de sanção criminal.

Internacionalmente, a ICAO recomenda a criação de zonas de exclusão óptica ao redor de aeródromos (*Optical Interference Zones*), limites de potência para uso civil e campanhas públicas sobre os riscos dos emissores laser (ICAO, 2003). A FAA, por meio da Advisory Circular AC 70-1B, exige a notificação de incidentes e estabelece zonas específicas (*Laser-Free*, *Critical* e *Sensitive*) com limites técnicos fundamentados na distância de risco ocular (FAA, 2022). O UK CAA, através do CAP 736, regulamenta o uso de luzes direcionadas, exigindo registro e autorização para emissões próximas ao espaço aéreo controlado (UK CAA, 2011); na Austrália é imposto o licenciamento obrigatório para dispositivos acima de 1 mW nas áreas urbanas próximas a aeroportos (CASA, 2023).

Apesar da tipificação criminal prevista no ordenamento brasileiro e do reconhecimento institucional da gravidade do fenômeno, a ausência de regulação técnica específica sobre zonas de exclusão, registro obrigatório de emissores ou diretrizes claras de atuação operacional gera uma lacuna substancial. Essa fragilidade normativa e estrutural limita a capacidade de mitigação sistêmica no Brasil, sublinhando a necessidade de abordagens operacionais mais efetivas.

3 ABORDAGEM METODOLÓGICA

Este estudo adota uma abordagem quantitativa, descritiva e aplicada, voltada à análise de ocorrências de interferência por radiação laser reportadas no Brasil entre os anos de 2020 e 2024. A metodologia foi estruturada em: (i) coleta e tratamento dos dados; (ii) categorização e estruturação das variáveis; e (iii) modelagem probabilística por meio de Rede Bayesiana.

3.1 Coleta e Tratamento dos Dados

A base empírica deste estudo foi construída a partir do sistema oficial de notificações do Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), contemplando registros de interferência por radiação laser no espaço aéreo brasileiro entre janeiro de 2020 e julho de 2024. Os

dados foram inicialmente disponibilizados em formato tabular (.xlsx), contendo 1.983 registros, com variáveis relativas a informações operacionais e contextuais — incluindo agente notificador, operador da aeronave, aeródromo de referência, data, hora local, unidade federativa, fase da operação, consequências relatadas e um campo livre de observações qualitativas.

Durante o processo de inspeção exploratória, verificaram-se inconsistências de preenchimento e heterogeneidade terminológica, especialmente nos campos relativos às consequências visuais adversas, tempo de exposição e fases do voo. Para mitigação dessas limitações, foi conduzido um processo sistemático de filtragem, limpeza e padronização, por meio de scripts desenvolvidos em Python (bibliotecas Pandas e NumPy), assegurando coerência e rastreabilidade dos dados analisados. Como critérios de inclusão, foram considerados apenas os registros que atendam simultaneamente aos seguintes requisitos:

- Notificações realizadas por pilotos de aeronaves civis ou por controladores de tráfego aéreo (excluindo-se relatos de outros agentes ou observadores não operacionais e relatos repetidos para a mesma ocorrência);
- Ocorrência registrada durante as fases críticas de voo: aproximação final, pouso, decolagem e subida, conforme a classificação da coluna "Fase da Operação";
- Presença de pelo menos uma variável-chave entre: cor do laser, tempo de exposição, tipo de consequência adversa relatada, ou ocorrência de manobra evasiva;
- Informações completas e consistentes sobre a data/hora da ocorrência e o aeródromo de referência.

Após a aplicação dos filtros de consistência e relevância, obteve-se uma amostra final composta por 394 registros válidos de interferência a laser, discriminados conforme a fase do voo: 300 registros na fase de aproximação final, 23 em pouso, 42 em decolagem e 29 durante a subida. Observou-se predominância de notificações realizadas por controladores de tráfego aéreo com 71% dos registros, enquanto os pilotos foram responsáveis por 29% das notificações.

3.2 Categorização das Variáveis

Após a filtragem dos registros, as variáveis de interesse foram organizadas em categorias discretas para viabilizar a modelagem probabilística. As fases de voo foram restritas a aproximação final, pouso, decolagem e subida, por representarem os momentos de maior vulnerabilidade à interferência externa, conforme documentado na literatura (Nakagawara et al., 2004; FAA, 2022). Foi desenvolvido algoritmo em Python com a base de dados coletada para agrupar os dados e analisar as estatísticas do modelo probabilístico. As variáveis foram estruturadas da seguinte forma:

- **Localidade:** representada pelas localidades estaduais dos aeroportos.
- **Cor do laser:** agrupada em três categorias – verde, vermelho e outras cores.
- **Tempo de exposição:** padronizado em intervalos de até 5 segundos (curto): de 6 a 15 segundos (médio); e maior que 15 segundos (longo).
- **Consequências:** categorizadas em seis tipos principais – distração, ofuscamento, cegueira temporária, formação de imagens, múltiplos efeitos (efeitos combinados) e sem efeito.
- **Horário:** diurno (de 06h00 às 17h59) e noturno (de 18h00 às 5h59).
- **Fase de Voo:** Aproximação final, pouso, decolagem e subida.
- **Manobra evasiva:** variável binária (Sim/Não), conforme relato expresso no campo de observação ou quando relatada arremetida.

3.3 Modelagem com Redes Bayesianas

A etapa de modelagem foi conduzida com base na metodologia de Redes Bayesianas (RB), uma abordagem estatística amplamente utilizada em sistemas complexos e incerteza operacional, por permitir a representação gráfica das relações causais entre variáveis aleatórias. Cada nó da RB corresponde a uma variável categórica do estudo, enquanto os arcos direcionados representam vínculos de dependência probabilística entre elas (Pearl, 1988; Fenton & Neil, 2018).

As Redes Bayesianas são modelos probabilísticos que combinam estrutura causal e inferência estatística para representar dependências entre variáveis em contextos incertos. Baseadas na Teoria

de Bayes, organizam-se como grafos direcionados acíclicos (DAG), em que nós representam variáveis e arcos, relações condicionais (Pearl, 1988; Jensen & Nielsen, 2007). Apresentam amplas aplicações como diagnóstico de falhas em de sistemas e análise de risco, integram dados empíricos e expertise, conforme novas evidências (Bobbio et al., 2001; Neil et al., 2000). A inferência segue o Teorema de Bayes, conforme a Eq. 1.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad \text{(Eq. 1)}$$

A formulação geral da distribuição conjunta de um conjunto de variáveis $X=\{X_1,X_2,...,X_n\}$ dentro de uma RB é expressa como na Eq.2:

$$P(X_1, X_2, ..., X_n) = \prod_{i=1}^{n} P(X_i \mid \mathrm{Pa}(X_i)) \quad \text{(Eq. 2)}$$

Em que $P_a\,(X_i)$ representa o conjunto de variáveis-pai de X_i, ou seja, aquelas das quais a variável depende condicionalmente.

A escolha por Redes Bayesianas decorre de quatro demandas do problema: (i) incerteza e dados faltantes/heterogêneos; (ii) dependências condicionais entre variáveis categóricas (cor do laser, tempo de exposição, fase do voo etc.); (iii) interpretação causal transparente para suporte à decisão; e (iv) capacidade de simulação de cenários operacionais com múltiplas evidências, preservando coerência probabilística global. Nessas condições, métodos frequentistas clássicos como regressão logística ou classificadores lineares apresentam limitações operacionais.

A parametrização das Tabelas de Probabilidade Condicional (CPTs) foi realizada com base nas frequências empíricas extraídas dos dados filtrados, conforme descrito nas seções anteriores. As CPTs foram preenchidas diretamente com base nesses dados, e foi utilizado recurso computacional Netica® para visualização dos cenários sem evidência e com evidência. Desenvolvido pela Norsys Software Corporation, amplamente utilizado em pesquisas operacionais e avaliações de risco em aviação, engenharia e medicina (Hanea et al., 2006; Kubat et al., 2011; Weber et al., 2012).

A estrutura da rede foi concebida com base na seguinte proposição causal: *"Se o piloto for exposto a determinado tipo de radiação laser (cor), durante um intervalo específico de tempo, quais os efeitos visuais adversos mais prováveis e a chance de ocorrência de manobra evasiva?*"

O modelo em Bayes desenvolvido neste estudo foi composto por oito variáveis principais, representadas pelos nós: Localidade, Cor do Laser, Tempo de Exposição, Horário da Ocorrência, Fase do Voo, Tipo de Consequência, Manobra Evasiva e Horário. A definição dos arcos causais da RB seguiu os princípios de modelagem probabilística defendidos por Pearl (1988) e Fenton & Neil (2018), a partir de premissas fundamentadas na literatura técnico-científica, regulamentos internacionais e evidências empíricas priorizando conexões com plausibilidade causal e evitando redundâncias ou relações espúrias. A RB foi então validada preliminarmente por meio de simulações de inferência e teste de consistência das probabilidades marginais e condicionais.

Diferentes regiões do Brasil apresentam padrões heterogêneos no uso de dispositivos emissores de laser, influenciando diretamente a cor predominante nos eventos registrados (CENIPA, 2024). A cor do feixe, por sua vez, está associada à gravidade dos efeitos visuais, sendo o laser verde (532 nm) os mais disruptivos à visão humana (FAA, 2022; CAA, 2023). A duração da exposição intensifica os efeitos: curtas, resultam em distração; prolongadas, em cegueira temporária ou combinações de efeitos (FAA, 2022; DeMik et al., 2013). A fase do voo também é determinante, com maior vulnerabilidade operacional em aproximações, pousos e decolagens (ICAO, 2004; CAA, 2023).

A ocorrência noturna potencializa a interferência, devido à dilatação pupilar e maior contraste com o feixe (FAA, 2022; Transport Canada, 2020). Efeitos mais severos (ex.: cegueira momentânea) estão correlacionados a manobras evasivas (Nakagawara et al., 2004). Além disso, laser de alta intensidade, especialmente verde e azul, aumentam a frequência de reações não programadas

(Młyńczak, 2022; CENIPA, 2024), sendo que exposições superiores a 3 segundos ampliam a chance de resposta imediata (DeMik et al., 2013).

4 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a distribuição marginal das variáveis categóricas e seus respectivos estados no modelo de Rede Bayesiana, antes da introdução de evidências.

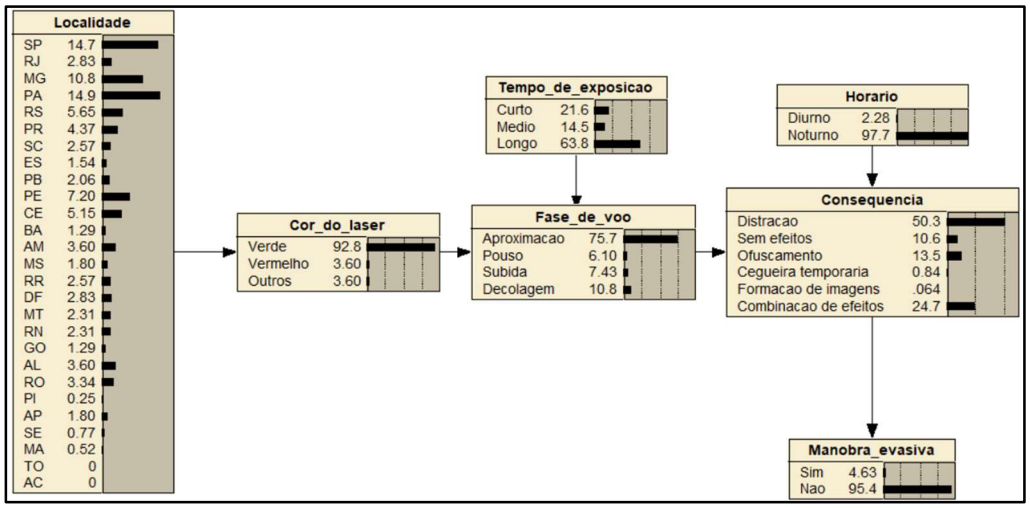


Figura 1: Estimativa do risco do impacto do laser sobre as operações de voo - Modelo sem evidência. Fonte: Autores.

Observa-se predominância de eventos com feixe laser de cor verde ($9{,}28\times10^{-1}$), ocorridos majoritariamente durante o período noturno ($9{,}77\times10^{-1}$) e na fase de aproximação final ($7{,}57\times10^{-1}$). As consequências relatadas mais frequentes foram distração visual ($5{,}03\times10^{-1}$) e combinação de múltiplos efeitos ($2{,}47\times10^{-1}$), seguidas por ofuscamento ($1{,}35\times10^{-1}$). A probabilidade marginal de ocorrência de manobras evasivas, estimada em $4{,}63\times10^{-2}$, ou seja, aproximadamente 4,63% dos registros analisados indicaram a adoção de alguma resposta operacional ativa por parte da tripulação, como arremetidas, desvios de trajetória ou recusa de decolagem.

Isso implica que, a cada 22 registros de exposição a laser, ao menos um resultou em alteração do procedimento padrão (SOP). Tal valor é compatível com evidências empíricas da literatura aeronáutica (Nakagawara et al., 2004; FAA, 2022), que indicam que nem todas as exposições provocam respostas evasivas, mas uma fração não desprezível demanda ruptura do perfil de voo.

Ainda que numericamente inferior, essa taxa representa um risco operacional concreto, com impacto direto sobre a carga cognitiva da tripulação, o desempenho situacional e a integridade da separação entre tráfegos. Portanto, o valor estimado de $4{,}63\times10^{-2}$ deve ser interpretado como um indicador de risco latente com potencial disruptivo, especialmente sob condições noturnas e nas fases finais de aproximação, em que a acuidade visual e a capacidade decisória são críticas.

4.1. Estimativa do Risco no Brasil

Com base no Anuário Estatístico da ANAC (2024), a aviação comercial regular no Brasil registrou 1.668.823 operações IFR de pouso e decolagem em 2023. O banco de dados do CENIPA contabilizou 1.904 notificações de exposições a laser entre 2020 e 2024. Essa incidência representa uma taxa estimada obtida por *k/N* notificações, com *k* igual a 1.904 e *N* igual ao total de operações IFR no período. Logo $P\ (exposição) = 2{,}28\times10^{-4}$ exposições por voo.

A Rede Bayesiana desenvolvida neste estudo, com base em 394 registros completos e validados referentes a fases críticas do voo, estimou que a probabilidade condicional de uma manobra evasiva. Dado que um episódio de exposição a laser, é de $P\ (evasiva \mid exposição) = 4{,}63\times10^{-2}$. Combinando ambas as probabilidades, o risco estimado de manobra evasiva por voo é de $P\ (evasiva\ por\ voo) = P(exposição)\ x\ P\ (evasiva \mid exposição) = 2{,}28\times10^{-4}\ x\ 4{,}63\times10^{-2} = 1{,}06\times10^{-5}$.

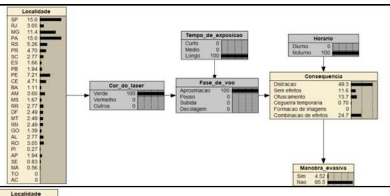
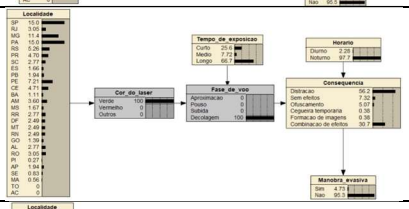
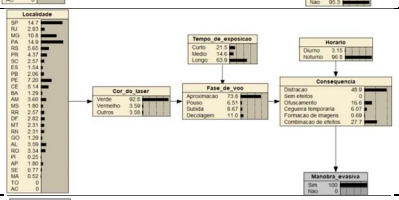
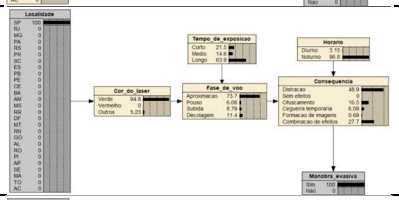
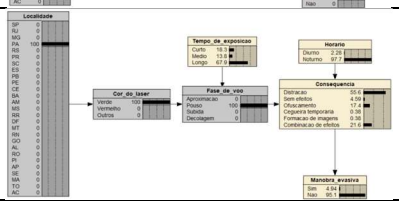
Em termos absolutos, temos: 1.668.823 voos/ano x $1{,}06\times10^{-5} \approx 17{,}7$ *eventos/ano.* Em termos operacionais, isso implica que, a cada 94 mil voos, é esperada aproximadamente uma ocorrência de resposta evasiva atribuída à interferência luminosa. Projetando esse risco sobre o total anual de voos comerciais, a expectativa é de aproximadamente 18 eventos de manobra evasiva por interferência a laser por ano no Brasil, assumindo a manutenção das taxas observadas no período 2020–2024.

Para quantificar a incerteza amostral das proporções, reportamos IC 95% de Wilson por apresentarem melhor cobertura em proporções raras e amostras moderadas e mostra o intervalo que indica a faixa plausível da estimativa dada a amostra. Logo, para *P (evasiva | exposição)* = 0,0463, o IC 95% está entre 0,029 a 0,071; e para *P (evasiva por voo),* está no intervalo de $[2{,}18;\ 2{,}38]\times10^{-4}$. Logo, o risco por voo assume um intervalo de $[6{,}3;\ 16{,}9] \times 10^{-6}$, ou seja, de ≈ 11 a 28 eventos/ano.

4.2. Análise de Cenários Propostos

Para avaliar a sensibilidade do modelo em diferentes contextos operacionais, foram definidos cinco cenários com inserção de evidências, conforme a Tabela 1. Esses cenários foram estabelecidos a partir da análise empírica da amostra, respaldada pela literatura (CAA, 2023; FAA, 2022; ICAO, 2012; DeMik et al., 2013; Nakagawara et al., 2004).

Tabela 1: Cenários propostos do modelo de risco do impacto do laser - Modelos com evidência. Fonte: Autores.

CENÁRIOS	CENÁRIOS	VARIÁVEIS COM EVIDÊNCIAS	JUSTIFICATIVA TÉCNICA
C1 Risco Máximo		Cor_do_laser = Verde Tempo_de_exposicao = Longo Fase_de_voo = Aproximacao Horario = Noturno	Condições mais prevalentes na base. Laser verde e tempo longo potencializam múltiplos efeitos durante a fase crítica (CAP 736; FAA, 2022).
C2 Situação de risco na decolagem		Cor_do_laser = Verde Fase_de_voo = Decolagem	Fase de voo crítica com certeza da incidência do laser.
C3 Ação de Reflexo Imediato		Manobra evasiva = Sim	Situação operacional com 100% de certeza de ocorrer manobra evasiva.
C4 Concentração de Ocorrências em Centro de Alta Densidade		Localidade = SP Manobra evasiva = Sim	SP é o segundo em número de ocorrências (14,6%) e o maior em movimento operacional de voos.
C5 Localidade crítica (PA)		Localidade = PA Cor_do_laser = Verde Fase_de_voo = Pouso	PA apresenta número elevado de ocorrências (14,9%), com padrão de risco operacional.

4.3. Resultados comparativos com o Cenários sem Evidência

O Cenário 1, tecnicamente classificado como de risco máximo, com presença simultânea de fatores agravantes segundo literatura internacional (FAA, 2022; CAA UK, 2021), a probabilidade agregada de consequências permaneceu estável, indicando que o Cenário 1 reflete fielmente o perfil de risco já consolidado na base empírica.

A análise comparativa entre o cenário sem evidências e o Cenário 2 evidencia alterações significativas na distribuição das consequências esperadas. A probabilidade de distração aumentou de 50,3% para 56,2%, mantendo-se como o efeito mais prevalente, com reforço do risco cognitivo atencional. Houve redução do estado sem efeitos, de 10,6% para 7,3%, sugerindo maior propensão à ocorrência de perturbações visuais. Observou-se também queda expressiva na probabilidade de ofuscamento isolado (13,5% para 5,1%), ao passo que a combinação de efeitos visuais simultâneos se elevou de 24,7% para 30,7%, indicando maior complexidade sintomática. Embora cegueira temporária e formação de imagens permaneçam pouco prováveis, ambas apresentaram leve variação, refletindo efeitos residuais sob exposição direcionada. Em síntese, o Cenário 2 acarreta intensificação de riscos operacionais na decolagem noturna sob laser verde, com destaque para manifestações visuais múltiplas, exigindo estratégias específicas de mitigação e resposta.

A ocorrência de manobra evasiva no Cenário 3 altera levemente o perfil das consequências. A distração segue como a mais provável (−0,9%), enquanto a ausência de efeitos aumenta (+0,7%), sugerindo mitigação parcial. A combinação de efeitos se mantém estável (+0,1%) e a formação de imagens desaparece (0%), indicando menor distorção visual sob reação imediata. A manobra tem efeito atenuador pontual, sem eliminar a complexidade sensorial. Sobre o Cenário 4, observa-se uma redução da probabilidade de ocorrência de eventos sem efeitos (de 10,6% para 0%), sinalizando que, sob as condições do Cenário 4, todos os casos resultam em algum tipo de impacto operacional ou fisiológico sobre a tripulação. Ainda que a distração tenha reduzido levemente (de 50,3% para 48,9%), tal variação sugere apenas um deslocamento de probabilidades para estados mais graves. O ofuscamento, por sua vez, subiu de 13,5% para 16,5%, reafirmando o comprometimento visual típico em exposições longas a feixes noturnos de alta intensidade.

No Cenário 5 observou-se um agravamento nos efeitos visuais isolados. A distração aumentou em 5,3%, consolidando-se como a consequência mais provável, enquanto o ofuscamento cresceu 3,9%, indicando uma intensificação da interferência luminosa. A categoria sem efeitos foi reduzida em 6,0%, sugerindo maior vulnerabilidade operacional nesta configuração.

5 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou, por meio de modelagem com Redes Bayesianas, que a exposição a laser representa risco concreto à segurança operacional, especialmente durante fases críticas do voo. A probabilidade estimada de manobra evasiva por voo é de $1{,}06\times10^{-5}$, o que projeta cerca de 18 eventos anuais no Brasil. A análise comparada dos cinco cenários operacionais revelou que a combinação de fatores como uso de laser verde, longa exposição, operação noturna, fase de pouso e ocorrência em localidades críticas (como o estado do Pará) amplia significativamente a probabilidade de consequências visuais adversas — especialmente distração, ofuscamento e múltiplos sintomas combinados. Embora a manobra evasiva atenue parcialmente efeitos visuais menos frequentes, ela não anula a complexidade sensorial do evento.

Além da identificação dos riscos operacionais, o estudo evidenciou uma lacuna normativa relevante no Brasil. A despeito da tipificação penal da conduta no Art. 261 do Código Penal, inexistem diretrizes técnicas complementares emitidas pela ANAC ou pelo DECEA que estabeleçam zonas de exclusão, limites de potência, protocolos operacionais ou medidas preventivas específicas. Este vácuo regulatório compromete a resposta institucional ao fenômeno. Diante disso, recomenda-se a adoção de protocolos normativos baseados em evidências, com suporte em técnicas quantitativas como as demonstradas neste estudo. Entre as medidas destacam-se: (i) padronização de procedimentos de cabine frente ao avistamento de laser, (ii) blindagem óptica parcial, e (iii) inclusão da temática nos programas de CRM (Crew Resource Management), conforme recomendam ICAO (2003), FAA AC 70-1B (2022) e UK CAA CAP 736 (2011).

6 REFERÊNCIAS

ANAC. (2024). *Anuário Estatístico do Transporte Aéreo – 2023*. Brasília: Agência Nacional de Aviação Civil. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e- estatisticas/anuario-estatistico/arquivos/2023/ anuario_estatistico_2023.pdf. Acesso em: 03 ago. 2025.

Bobbio, A., Portinaro, F., & Minichino, M. (2001). Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 71, 249–260. https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6

BRASIL. Código Penal Brasileiro. Decreto-Lei nº 2.848, de 7 de dezembro de 1940. Artigo 261 – Expor a perigo embarcação ou aeronave, própria ou alheia. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del2848compilado.htm. Acesso em: 25 jul. 2025.

CASA – Civil Aviation Safety Authority. (2024). *AC 139.E-03 v1.0 – Laser and Light Hazard Management*. Canberra: CASA. Disponível em: https://consultation.casa.gov.au/regulatory-program/draft-ac-139-e-03-v1-0. Acesso em: 25 jul. 2025.

Castro, A.M.A. de; Bandeira. M.C.G.S.P.; Correia, A.R. (2025). *Risk Analysis of Fireworks Balloons in Brazilian.* Airspace Aerosp. Technol. Manag., 17. https://doi.org/10.1590/jatm.v17.1386

CENIPA. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. *Relatórios estatísticos de interferência laser (2020–2024)*. Disponível em: https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/raio_laser. Acesso em: 25 jul. 2025.

DeMik, Randal J.; Harriman, Stanley; Phillips, Ryan S.; Crowder, Charles; Pfeifer, Jennifer A.; McHugh, Shane F.; Foster, Steven J.; De Waard, Elizabeth R.; Streit, Michael; Antoniolli, Richard B.; Knight, Ernest W.; York, David S.; and Luedtke, Jacob (2013) "Measuring Intensity of Laser Light Penetrating Flight Decks in Laser Illuminations," Journal of Aviation Technology and Engineering: Vol. 3: Iss. 1, Article 2. Disponível em: https://doi.org/10.7771/2159-6670.1068

FAA – Federal Aviation Administration (USA). (2022). *Advisory Circular AC 70-1B – Outdoor Laser Operations*. Washington, DC. Disponível em: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC.70-1B_Outdoor.Laser.Operations.pdf. Acesso em: 25 jul. 2025.

FAA – Federal Aviation Administration. (2024). *Laser Report Statistics*. Disponível em: https://www.faa.gov/about/initiatives/lasers. Acesso em: 25 jul. 2025.

Fenton, N., & Neil, M. (2018). *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks* (2. ed.). CRC Press.

Gosling, D. B., O'Hagan, J. B., & Quhill, F. M. (2016). Blue laser induced retinal injury in a commercial pilot at 1300 ft. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(1), 69–70. https://doi.org/10.3357/amhp.4411.2016

Hanea, A. M., Poot, A., & Stewart, T. J. (2006). Multi-criteria decision-making using conditional probabilities. *European Journal of Operational Research*, 170(1), 210–234. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.046

ICAO – International Civil Aviation Organization. (2003). *Manual on Laser Emitters and Flight Safety (Doc 9815)*. Montreal: ICAO. Disponível em: https://store.icao.int/en/manual-on-laser-emitters-and-flight-safety-doc-9815. Acesso em: 25 jul. 2025.

Jensen, F. V., & Nielsen, T. D. (2007). *Bayesian Networks and Decision Graphs* (2. ed.). New York: Springer.

Kubat, C., et al. (2011). Bayesian networks for safety analysis of commercial aircraft operations. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(1), 92–111.

Mlynczak, J. (2022). Calculation and analysis of laser hazard distances in navigable airspace for multi-beam visible CW laser radiation. *Advanced Optical Technologies*, 11(1–2), 33–46. https://doi.org/10.1515/aot-2022-0004

Nakagawara, V. B., Wood, K., & Montgomery, R. W. (2011). Laser illumination of f light crew personnel by month, day of week and time of day for 5-year study period: 2004-2008. Department of Transportation/Federal Aviation Administration, Washington, DC 20591. Report No. DOT/FAA/AM 11/7. At: https://www.faa.gov/data_research/research/ med_humanfacs/oamtechreports/2010s/media/201107.pdf

Neil, M., Fryer, K., & Fenton, N. (2000). Modelling operational risk in air traffic management. *Journal of Risk Research*, 3(4), 315–333. https://doi.org/10.1080/13669870050134167

Pearl, J. (1988). *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. San Mateo: Morgan Kaufmann.

Reidenbach, M. A. (2011). Laser hazards in aviation: An analysis of pilot-reported effects and exposure durations. *Aerospace Medical Association*.

TRANSPORT CANADA. (2020). *Aiming a laser at an aircraft is not bright idea*. Government of Canada. https://tc.canada.ca/en/campaigns/aiming-laser-aircraft-not-bright-idea

UK CAA – United Kingdom Civil Aviation Authority. (2011). *CAP 736 – Operation of Directed Light, Fireworks, Toy Balloons and Sky Lanterns within UK Airspace*. London. https://www.caa.co.uk/our-work/publications/documents/content/cap-736

Wawrzyński, W., et al. (2022). The potential impact of laser pointers on aviation safety. *Energies*, 15(17), 6226. https://doi.org/10.3390/en15176226

Weber, P., Medjaher, K., & Zio, E. (2012). Prognostics and health assessment of complex systems using Bayesian networks. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 265–274. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.006