XXI SITRAER
2024 | Air Transportation Symposium

TRANSFORMANDO A MOBILIDADE NA AMAZÔNIA: UMA ANÁLISE DE RISCOS E MITIGAÇÃO PARA VEÍCULOS DE EFEITO SOLO

Marina Ronconi de Oliveira[1], Daniel Marcus Correia Lima[2], Lucas Restivo de Oliveira[3], Moacyr Machado Cardoso Junior[4]
Aeronautics Institute of Technology (ITA)

[1]marina.oliveira.101443@ga.ita.br
[2]daniel.lima.101408@ga.ita.br
[3]lucas.oliveira.100475@ga.ita.br
[4]moacyr.cardoso@gp.ita.br

PAPER ID: SIT896647

ABSTRACT

The Amazon region faces complex logistical challenges due to its vast remote geography and weather conditions. Traditional transport modes such as boats and small planes often encounter inefficiencies and risks under these circumstances. This study proposes an analysis of an innovative solution: the use of ground-effect vehicles, which promise to be faster, safer, and more efficient. Through a Preliminary Risk Analysis (PRA), potential hazards have been identified, such as mechanical failures, risks of collisions with wildlife, adverse weather conditions, and navigation challenges. For each identified risk, mitigation strategies have been developed, including regular maintenance protocols, advanced pilot training, and the use of sophisticated navigation systems. Furthermore, the most significant risk analysis identified using the Bowtie method is underway, providing a comprehensive understanding of causes, consequences, and corresponding preventive and mitigation measures. This approach not only enhances transport efficiency in the Amazon but also has the potential to drive economic development, improve access to healthcare, and strengthen environmental conservation. This study is relevant to the literature as it presents an innovative solution to persistent logistical challenges in a crucial region, with the potential to positively impact diverse areas, from economic development to environmental preservation.

Keywords: Ground Effect Vehicles, Risk Analysis, Bowtie, Amazon.

ACKNOWLEGDEMENTS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia, os rios são as principais vias de transporte e comunicação, especialmente em áreas onde a infraestrutura rodoviária é limitada ou inexistente. Os rios permitem a ligação entre comunidades isoladas e as cidades maiores, facilitando o comércio, o acesso a serviços de saúde e educação, e a mobilidade das populações ribeirinhas. Cidades como Manaus, Belém e Santarém são importantes centros urbanos que dependem fortemente do transporte fluvial para seu abastecimento e desenvolvimento econômico. Além disso, as chuvas intensas e frequentes, comuns na região, podem causar inundações e deslizamentos de terra, interrompendo o tráfego rodoviário e fluvial. As aeronaves de efeito solo podem operar em áreas onde a infraestrutura aeroportuária e rodoviária é limitada ou inexistente, utilizando os rios como pistas naturais de decolagem e pouso, facilitando o acesso a comunidades remotas e isoladas, melhorando a conectividade regional. Estas aeronaves podem atingir velocidades significativamente maiores do que os barcos tradicionais, reduzindo o tempo de viagem entre localidades distantes, o que é particularmente útil para o transporte de mercadorias perecíveis e serviços de emergência.

O transporte na região amazônica apresenta desafios únicos e significativos devido às suas vastas extensões, variações sazonais de volume de água, presença de obstáculos naturais e a densa vegetação ao redor. Essas características tornam o transporte convencional por terra muitas vezes impraticável e lento, destacando a necessidade de alternativas eficientes e seguras. Nesse contexto, a aplicação de veículos de efeito solo emerge como uma solução inovadora e promissora. Os veículos de efeito solo, também conhecidos como WIG (*Wing-In-Ground effect*), são projetados para operar perto da superfície da água, aproveitando o efeito aerodinâmico conhecido como efeito solo para obter maior eficiência aerodinâmica e reduzir o consumo de combustível. Essa tecnologia permite que as aeronaves voem a velocidades elevadas com maior estabilidade e menor resistência, tornando-se particularmente vantajosas para a navegação nos rios amazônicos.

A utilização de aeronaves de efeito solo na região amazônica oferece várias vantagens estratégicas. Primeiramente, essas aeronaves podem operar em áreas onde a infraestrutura aeroportuária é inexistente ou limitada, utilizando os rios como pistas naturais de decolagem e pouso. Além disso, a capacidade de voar próximo à superfície minimiza o risco de colisões com aves e reduz o impacto ambiental, ao contrário das aeronaves convencionais que operam em altitudes mais elevadas. Seu consumo de combustível é mais eficiente, o que contribui para a redução das emissões de carbono. A capacidade de decolar e pousar em superfícies aquáticas proporciona maior flexibilidade em situações de emergência, onde o pouso em terra firme pode não ser possível.

A integração de aeronaves de efeito solo no sistema de transporte da Amazônia pode revolucionar o acesso a comunidades remotas, proporcionando uma logística mais rápida e confiável para o transporte de passageiros, mercadorias e serviços de emergência, em substituição às “ambulanchas”. No entanto, a introdução dessa tecnologia também exige uma análise minuciosa dos riscos envolvidos, garantindo a segurança e a viabilidade operacional. A metodologia deste estudo foi estruturada para abordar a viabilidade, segurança e eficácia do uso de veículos WIG para transporte em rios na Amazônia. O processo incluiu a seleção de ferramentas de análise de risco, a coleta de dados relevantes, a avaliação dos riscos identificados e o desenvolvimento de estratégias de mitigação.

Para este artigo, foi realizado um estudo de análise de riscos utilizando a Análise Preliminar de Perigos (*Preliminary Hazard Analysis* - PHA) para avaliar os potenciais perigos e desenvolver medidas de prevenção e mitigação adequadas para a operação de aeronaves de efeito solo nos rios da Amazônia. A partir desta análise, o risco mais significativo foi conduzido para a utilização do método Bowtie, que complementa a PHA ao fornecer uma compreensão mais profunda das causas, consequências e medidas de mitigação correspondentes, o que é útil para a gestão de riscos em operações complexas, como a operação de aeronaves de efeito solo nos rios da Amazônia.

2. TECNOLOGIAS DE EFEITO SOLO: HISTÓRIA, DESAFIOS E POSSIBILIDADES

Os desafios logísticos e ambientais da Amazônia apresentam uma oportunidade única para a implementação de tecnologias inovadoras. Estudos anteriores destacaram a eficácia dos WIGs em contextos similares, fornecendo uma base sólida para avaliar sua aplicabilidade na Amazônia.

A história dos veículos de efeito solo remonta aos primórdios da aviação, quando engenheiros e inventores buscavam criar aeronaves capazes de voar de forma eficiente minimizando o consumo de combustível e os custos operacionais. Essa busca pela eficiência energética logo se conectou ao conceito do efeito solo, que permite que uma aeronave voe rente à superfície da água, por exemplo, aproveitando o aumento da força de sustentação gerada pela proximidade com a superfície.

A aplicação mais antiga do efeito solo, ainda que de forma não intencional, foi feita pelos irmãos Wright, que encontraram esse fenômeno disfarçado como efeito de amortecimento ou pouso "panqueca", como haviam chamado (Rozhdestvensky, 2006). Nos anos de 1930 e 1931, o hidroavião Dornier DO-X mostrou que o efeito solo permitia aumentar a carga útil e o alcance dos voos transatlânticos. Além disso, melhorias na condução e manuseio de aeronaves militares como o F-105D, B-58 e Avro Vulcan foram constatadas, mesmo quando voavam a alturas superiores a cinco comprimentos de envergadura acima do solo.

Toivo Kaario, engenheiro finlandês, foi um dos pioneiros no campo dos veículos de almofada de ar, iniciando seus trabalhos na década de 1930. Ele construiu sua primeira embarcação em efeito solo, conhecida como Wing-Ram. Seus testes iniciais com o Aerosledge No. 8 marcaram o início de uma série de experimentações que moldariam o futuro dos veículos de efeito solo. O Aerosledge No. 8 apresentava uma asa de pequena proporção, apoiada em esquis nas pontas, propulsão frontal com um jato de ar direcionado sob a asa principal e duas vigas traseiras longitudinais com pequenas superfícies estabilizadoras. Na mesma época, ao final dos anos 1930, o engenheiro sueco Troeing seguiu essa ideia e contribuiu para o desenvolvimento dessa tecnologia.

Nos finais dos anos 1950 e inícios dos anos 1960, Rostislav Alexeyev, renomado cientista da antiga URSS, trouxe à vida o conceito prático dos WIGs. Em 1942, encarregado do desenvolvimento de hidrofólios para a Marinha Soviética, Alexeyev iniciou um trabalho que resultou em vários barcos de transporte de passageiros até o final dos anos 1970. Reconhecendo o potencial da velocidade dos hidrofólios, ele percebeu que poderiam alcançar velocidades ainda maiores se viajassem logo acima da superfície da água. Assim, surgiu a ideia de acrescentar asas de envergadura curta e corda larga às embarcações para levantar seus cascos totalmente da água, permitindo-lhes viajar sobre uma almofada de ar. Este tipo de embarcação, aproveitando o efeito solo, foi denominado "Ekranoplan", em russo, que significa "plano de tela".

Quanto à Rússia, no final dos anos 1950, Alexeyev e sua equipe começaram a trabalhar em veículos de teste em diversas escalas para explorar melhor o conceito de Ekranoplan. O primeiro, o SM-1, realizou seu primeiro voo em 22 de julho de 1961, equipado com um único motor a jato e duas asas. Em março de 1962, concluíram o segundo protótipo, o SM-2, caracterizado por uma única asa principal e um grande estabilizador horizontal.

O KM, conhecido como "Caspian Sea Monster", foi o ápice desse esforço, realizando seu primeiro voo em 14 de agosto de 1967. Era a maior aeronave do mundo na época (Sinitsyn & Maskalik, 1996), com capacidade para transportar 900 passageiros a uma velocidade de 500 milhas por hora, comparável à velocidade de algumas aeronaves.

Enquanto isso, a pesquisa de embarcações de efeito solo começou em 1964 na Alemanha. O aerodinamicista Alexander Lippisch introduziu o conceito de veículos de efeito solo baseados em asas delta invertidas. A grande vantagem dessa configuração é sua maior estabilidade em pitch e a capacidade de voar em efeito solo a altitudes de até 50% de sua envergadura, permitindo operação em águas agitadas. Em 1963, ele construiu seu primeiro protótipo, o X-112 "Aerofoil Boat". Este veículo apresentava alongamento moderado de aproximadamente 3 e um diedro inverso, permitindo elevação do casco em relação à superfície da água.

No início dos anos 1970, Lippisch projetou seu último veículo de efeito solo: o X-114 "Aerofoil Boat". Este foi o maior veículo desenvolvido por Lippisch, com capacidade para seis passageiros. Era

movido por um motor Lycoming O-360 flat-four de 200 HP, acionando uma hélice pusher de cinco pás. O X-114 foi equipado com hidrofólios inclinados para baixo montados em seus flutuadores, visando diminuir a velocidade de decolagem.

Os esforços de Alexeyev também se estenderam ao Orlyonok, projetado para transportar tropas pela Marinha Soviética. Apesar de alguns sucessos, como a entrega de três unidades à Marinha Russa, a série enfrentou desafios técnicos e operacionais, culminando em um acidente em 1975 e, eventualmente, o abandono do projeto.

Ao longo das décadas seguintes, diversos modelos de ecranoplanos foram desenvolvidos e testados, projetado para ser um veículo de ataque rápido. Embora inicialmente concebidos para uso militar, esses veículos também despertaram interesse para aplicações civis, como transporte marítimo rápido e missões de busca e resgate. Nos Estados Unidos, em 1984, Steven Hooker, um engenheiro aeronáutico e analista de inteligência, dedicou-se ao desenvolvimento de uma embarcação de efeito solo em escala real. Para concretizar sua visão, ele fundou sua própria empresa, a Aerocon, com o objetivo de criar uma embarcação monumental chamada Wingship. Hooker propôs uma embarcação de efeito solo com capacidade de carga de cinco mil toneladas, podendo transportar até mil e quinhentas toneladas de carga útil.

Apesar da ambiciosa proposta, a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa dos EUA (ARPA) recebeu o projeto com ceticismo (Yin et al, 2015). A ARPA levantou dúvidas sobre a viabilidade técnica e econômica do Wingship, resultando em uma falta de entusiasmo e, eventualmente, no término do projeto.

Originalmente, o veículo de efeito solo foi desenvolvido e pesquisado para uso militar, principalmente na antiga União Soviética. No entanto, atualmente, esse tipo de embarcação tem despertado interesse global para aplicações civis e comerciais em diversos países.

A Regent SeaGlider, empresa americana com sede na Flórida, está inovando no transporte marítimo costeiro com o Viceroy, um veículo de efeito solo elétrico projetado para transportar até 12 passageiros de forma rápida e sustentável. A Aron Flying Ship da Coreia do Sul também está envolvida no desenvolvimento de WIGs com um veículo para até 8 passageiros.

Em Singapura, a Wigetworks se destacou com o AirFish 8, um WIG capaz de transportar de 8 a 10 passageiros a uma velocidade de até 195 km/h, voando a 7 metros sobre a água com motorização a gasolina automotiva.

No Brasil, a startup AeroRiver está testando o Volitan, um barco voador adaptado especificamente para a Amazônia. Com 18 metros de comprimento, o Volitan voa entre 5 a 10 metros acima da água, alcançando até 150 km/h e com autonomia de até 450 quilômetros sem reabastecimento, oferecendo uma alternativa eficiente e sustentável para navegação na região.

Além dos projetos mencionados, a Rússia está revivendo a tecnologia dos ecranoplanos com iniciativas como o projeto militar “Orlan” e os ecranoplanos comerciais da RDC Aqualines na Europa, que visam conectar rapidamente áreas ao redor do Golfo da Finlândia.

Tabela 1 - Protótipos de veículos de efeito solo atualmente

Nome	Fabricante	País	Peso/Assentos	Velocidade máxima	Finalidade
Viceroy	Regent Craft Inc.	Estados Unidos	12 passageiros	290 km/h	Transporte costeiro, veículo elétrico
AirFish 8	Wigetworks	Singapura	8 a 10 assentos	195 km/h	Transporte marítimo civil
Aron M80	Aron Flying Ship	Coreia do Sul	Até 8 passageiros	250 km/h	Transporte marítimo
Volitan	AeroRiver	Brasil	10 passageiros ou 1 tonelada em carga	150 km/h	Transporte na região amazônica
Aqualines Ekranoplans	RDC Aqualines	Europa	2 a 300 assentos	Até 320 km/h	Transporte aquático

2.1 Lacuna teórica identificada

Embora existam estudos detalhados sobre o uso de WIGs em diversas regiões, há uma lacuna significativa na literatura específica sobre sua aplicação na Amazônia. Por esse motivo, a dimensão de probabilidade precisou ser abordada adicionamento a força dos julgamentos de conhecimento (Strenght of Knowledge - SoKs) a ela. Os julgamentos fornecem uma classificação qualitativa de quão forte é o conhecimento que apoia as atribuições de probabilidade (Askeland et al, 2017). Essa escassez de dados resultou em uma classificação inicial baixa dos SoKs das barreiras identificadas no Bowtie, tornando este artigo o primeiro passo para novos estudos na área.

3. METODOLOGIA

3.1 Análise Preliminar de Perigos

A Análise Preliminar de Perigos (*Preliminary Hazard Analysis* - PHA) é uma metodologia qualitativa amplamente utilizada para identificar e avaliar os riscos em projetos de engenharia, especialmente na fase inicial de desenvolvimento. A aplicação de PHA é particularmente benéfica em contextos onde a viabilidade de um projeto precisa ser validada, mas os dados quantitativos ainda são escassos ou inexistentes.

Este método envolve a revisão detalhada de todos os aspectos operacionais e técnicos, considerando diversos cenários de falha e suas consequências. No que concerne a flexibilidade e a adaptabilidade, a PHA é altamente flexível e adaptável a diferentes contextos e tipos de projetos, podendo ser pode ser aplicada independentemente da maturidade do projeto ou da disponibilidade de dados históricos, o que se torna especialmente útil na fase inicial de projetos inovadores, como a introdução de veículos de efeito solo na Amazônia, onde ainda não existem dados operacionais extensivos, pois pode ajudar a identificar melhorias de projeto, procedimentos operacionais seguros e requisitos de manutenção que minimizem os riscos associados às operações em um ambiente desafiador como é a Amazônia.

Para o projeto dos WIGs, a contribuição de especialistas em navegação fluvial, engenharia aeronáutica e segurança ambiental pode proporcionar uma compreensão mais completa dos riscos. O principal objetivo da PHA é identificar perigos potenciais e desenvolver medidas de prevenção e mitigação antes que o projeto avance para fases mais detalhadas e custosas. Esta abordagem preventiva ajuda a evitar surpresas desagradáveis e falhas catastróficas durante a implementação.

Outra vantagem do modelo reside no fato de que realizar uma PHA é relativamente mais econômico e tecnicamente mais acessível em comparação com métodos quantitativos mais complexos, como a Análise Quantitativa de Risco (QRA). A PHA pode ser conduzida com recursos limitados e em um curto espaço de tempo, proporcionando resultados rápidos que são essenciais para a tomada de decisões iniciais, sendo particularmente importante quando se considera a necessidade de validar rapidamente a viabilidade de novas tecnologias, como as aeronaves de efeito solo. A PHA permite a priorização dos riscos identificados com base em sua severidade e probabilidade de ocorrência. Esta priorização é fundamental para direcionar recursos e esforços para as áreas mais críticas, garantindo que os riscos mais significativos sejam tratados primeiro. Para a operação de aeronaves de efeito solo, isso pode significar concentrar-se inicialmente em desafios como a navegação segura em águas turbulentas ou a mitigação de impactos ambientais.

3.2 Bowtie

O método Bowtie já foi utilizado em outras situações, como no estudo que avaliou os fatores de risco de falha das válvulas de segurança downhole (Guohai et al., 2024), crucial para a segurança das operações de extração de petróleo e gás, usado para identificar causas de falhas e consequências de acidentes, fundamentando a análise quantitativa de riscos. A análise proporcionou diretrizes para medidas de gestão in loco e melhoria dos projetos de válvulas. Outro estudo utilizou o mesmo modelo

para identificar barreiras de segurança faltantes nas Unidades de Terapia Intensiva (UTIs) (Kerckhoffs et al, 2013), demonstrando que o Bowtie pode ser aplicado para melhorar a segurança do paciente, identificando e mitigando riscos potenciais antes que ocorram incidentes.

O método Bowtie é uma ferramenta muito utilizada na análise e gestão de riscos, conhecida por sua capacidade de apresentar uma visualização clara e intuitiva das relações entre causas, eventos e consequências de riscos. O nome "Bowtie" deriva da forma gráfica do diagrama, que se assemelha a uma gravata borboleta, com um evento central conectado às causas e consequências por meio de barreiras preventivas e de mitigação.

3.3 Metodologia proposta

A metodologia PHA foi aplicada para identificar e categorizar os riscos em várias categorias, como falhas mecânicas, colisões com animais selvagens e condições climáticas adversas. Cada risco foi avaliado quanto à sua severidade e probabilidade de ocorrência, permitindo uma priorização eficaz. Por exemplo, no estudo, falhas mecânicas foram identificadas como tendo alta severidade e alta probabilidade, o que levou a sua priorização em relação a outros riscos, como colisões com pássaros.

Após identificar o risco mais relevante, o método Bowtie é utilizado para detalhar o evento de interesse e as medidas de controle associadas. No centro do diagrama, representado por um círculo vermelho, está o "evento de interesse", que simboliza um incidente ou falha potencial, e acima dele a fonte de risco. À esquerda do nó central, são listadas as "ameaças", representadas por retângulos azuis, que são os fatores iniciais que podem desencadear o processo de risco. Cada ameaça está conectada ao evento de interesse por "barreiras preventivas", desenhadas como barras verticais, que têm a função de impedir que as ameaças resultem no evento de interesse. Adicionalmente, fatores que podem causar a falha dessas barreiras preventivas são incluídos no diagrama, representados por retângulos amarelos.

À direita do nó central, encontram-se as "consequências" do evento de interesse, representadas por retângulos vermelhos. As "barreiras reativas", também desenhadas como barras verticais, são colocadas para reduzir a severidade ou o impacto dessas consequências caso o evento ocorra. Fatores que podem intensificar as consequências também são representados como retângulos amarelos, com suas respectivas barreiras reativas incluídas no diagrama.

Uma das principais vantagens do método Bowtie é sua simplicidade visual. Ao contrário de outras técnicas de análise de risco, como a Análise de Árvore de Falhas (FTA) e a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA), o diagrama Bowtie permite uma rápida compreensão das relações causais e das medidas de controle associadas. A FTA, por exemplo, embora detalhada, pode ser complexa e difícil de interpretar sem treinamento especializado. A FMEA, focada em modos de falha específicos e seus efeitos, pode não capturar de maneira tão eficaz as interações entre diferentes riscos e controles como o Bowtie.

A estrutura do diagrama Bowtie, portanto, oferece uma visão completa e equilibrada do risco, destacando não apenas as causas e consequências, mas também as medidas preventivas e de mitigação que podem ser implementadas para gerenciar o risco de forma eficaz. Esta visualização facilita a identificação de pontos fracos no sistema de controle e a implementação de medidas corretivas.

4. RESULTADOS

A metodologia PHA foi estruturada em colunas, conforme Tabela 2, como Risco, Causa Potencial, Consequências Potenciais, Probabilidade, Severidade, Evitabilidade, Tipo de Risco e Medidas de Mitigação, permitindo a análise sistemática dos riscos desde as fases iniciais de planejamento ou operação.

Para calcular o Índice de Risco (R-tipo), utilizou-se uma fórmula que multiplica os pesos atribuídos a cada classificação e, em seguida, somam-se os resultados. Os pesos foram definidos como 1 para "Baixo", 2 para "Médio" e 3 para "Alto". Especificamente, foram atribuídos pesos de 2 para

probabilidade, 3 para severidade e 1 para evitabilidade, gerando p-1, s-1 e e-1, respectivamente. Os valores finais estão na coluna R-tipo.

A PHA permitiu uma análise detalhada e sistemática dos riscos desde as fases iniciais de planejamento ou operação. Ao calcular o Índice de Risco, a planilha oferece uma medida quantitativa da gravidade dos riscos, destacando aqueles que demandam maior atenção e a implementação de medidas preventivas eficazes. É importante destacar que os índices classificatórios foram definidos para diferenciar as probabilidades, severidades e evitabilidades, com o objetivo de obter um R-Type significativo e permitir a qualificação dos riscos mais evidentes. Essa abordagem realística visa ajudar os Engenheiros de Aplicação a escolher quais medidas de controle devem ser priorizadas. Assim, a gama de escolhas é reduzida em termos de priorização de tarefas, possibilitando uma melhor alocação de recursos. Isso ocorre porque quantificar a mitigação de todos os riscos levantados pela equipe de análise pode ser extremamente difícil.

Tabela 2 - PHA de um WIG

Risco	Causas potenciais	Consequências potenciais	Probabilidade	p-i	Severidade	s-i	Evitabilidade	e-i	R-tipo	Medidas de mitigação
Colisão com obstáculos	Obstáculos flutuantes	Danos ao avião, naufrágio	Alta	3	Alta	3	Alta	3	18	Uso de radar, monitoramento visual
Falha mecânica	Manutenção inadequada	Parada do motor, acidente	Alta	3	Alta	3	Média	2	17	Inspeção regular, pré-voo
Falha de propulsão	Superaquecimento, defeito de fabricação	Parada do motor	Alta	3	Alta	3	Baixa	1	16	Manutenção
Condições meteorológicas adversas	Tempestades, neblina	Desorientação, perda de controle	Alta	3	Média	2	Alta	3	15	Previsão do tempo, treinamento de pilotos
Interação com fauna	Colisão com animais aquáticos	Danos ao avião	Alta	3	Média	2	Média	2	14	Monitoramento visual, rotas seguras
Erro de operação	Decisões inadequadas dos pilotos	Acidente, danos ao avião	Alta	3	Média	2	Baixa	1	13	Treinamento extensivo, simulações
Falha elétrica	Sobrecarga ou curto-circuito	Perda de sistemas críticos	Alta	3	Baixa	1	Alta	3	12	Inspeção regular, backup de sistemas
Falha de comunicação	Interferência ou equipamento defeituoso	Falta de coordenação, acidentes	Alta	3	Baixa	1	Média	2	11	Equipamentos redundantes, procedimentos claros
Poluição de combustível	Contaminação	Danos ao motor, parada do motor	Alta	3	Baixa	1	Baixa	1	10	Testes de qualidade, filtros substituíveis
Falha estrutural	Material defeituoso ou fadiga	Desintegração em voo	Média	2	Alta	3	Alta	3	16	Inspeção regular, manutenção preventiva
Desvio de rota	Erro de navegação	Perda de combustível, risco de pouso forçado	Média	2	Alta	3	Média	2	15	Treinamento de navegação, sistemas GPS
Interferência de sinal	Fontes externas de interferências	Perda de comunicação, navegação	Média	2	Alta	3	Baixa	1	14	Proteção contra interferência, sistemas
Inundações	Chuvas intensas, marés altas	Dificuldade de decolagem/pouso, danos	Média	2	Média	2	Alta	3	13	Monitoramento climático,
Falta de combustível	Planejamento inadequado	Pouso forçado, acidente	Média	2	Média	2	Média	2	12	Planejamento cuidadoso, reservas de combustível
Pássaros	Colisão em voo	Danos à aeronave, acidente	Média	2	Média	2	Baixa	1	11	Sistemas de dissuasão, rotas alternativas
Falhas de sistemas de controle	Software ou hardware defeituoso	Perda de controle da aeronave	Média	2	Baixa	1	Alta	3	10	Inspeções rigorosas, redundância do sistema
Falha hidráulica	Vazamento ou bloqueio	Perda de controle de superfícies móveis	Média	2	Baixa	1	Média	2	9	Manutenção regular, sistemas de backup
Intoxicação da tripulação	Exposição à substâncias tóxicas	Incapacidade, acidentes	Média	2	Baixa	1	Baixa	1	8	Monitoramento de saúde, controle de substâncias
Problemas de visibilidade	Neblina, fumaça	Desorientação, colisões	Baixa	1	Alta	3	Alta	3	14	Equipamento de navegação
Condições de maré	Maré alta ou baixa	Dificuldade na decolagem ou pouso	Baixa	1	Alta	3	Média	2	13	Planejamento de operações, treinamento
Vandalismo	Acesso não autorizado	Danos à aeronave, sabotagem	Baixa	1	Alta	3	Baixa	1	12	Segurança reforçada, vigilância contínua

O primeiro passo na construção de um diagrama Bowtie genérico é a identificação do evento de topo. No contexto dos WIGs para transporte em rios na Amazônia, o evento de topo é oriundo da

análise de riscos efetuada, que pode ser um acidente grave envolvendo a falha do sistema de sustentação do efeito solo, resultando em uma colisão com a superfície do rio. Este evento de topo deve ser claramente definido e específico, representando um ponto crítico onde o controle pode ser perdido e as consequências podem se manifestar.

Uma vez identificado o evento de topo, o próximo passo foi listar as ameaças que podem levar a esse evento. As ameaças são as causas ou condições que podem desencadear o evento de topo. No caso dos WIG na Amazônia, conforme detalhado anteriormente, essas ameaças podem incluir desde falhas mecânicas até colisões com a vida selvagem. O mesmo para as barreiras preventivas que são medidas ou controles projetadas para impedir que as ameaças causem o evento de topo, como manutenção, treinamento e sistemas de monitoramento. Após a identificação das ameaças e suas respectivas barreiras preventivas, o próximo passo é identificar as consequências do evento de topo. As consequências são os resultados potenciais que podem ocorrer se o evento de topo se materializar, no caso de um acidente com um WIG na Amazônia. Para cada consequência identificada, é necessário desenvolver barreiras de mitigação.

Para todas as barreiras, tanto as relacionadas às prevenções das ameaças quanto das mitigações das consequências, foram avaliados possíveis fatores de escalonamento das consequências. Barreiras adicionais foram identificadas para minimização ou eliminação desses fatores.

Os contextos nos quais cada barreira é aplicável foram identificados e descritos no diagrama “Bowtie", assim como o *Strength of Knowledge* relacionado. Importante mencionar que os SoKs de grande parte das barreiras foram classificados como "baixo", evidenciando a necessidade de maiores e mais aprofundados estudos relacionados a essa operação para uma maior assertividade da viabilidade e relevância de cada barreira. Essa classificação foi definida de acordo com o exposto por Terje Aven (2013), cujas seguintes condições foram consideradas verdadeiras e, portanto, considera-se o risco de desvio da suposição alto:

a) As suposições feitas representam fortes simplificações.
b) Dados não estão disponíveis ou são pouco confiáveis.
c) Há falta de concordância/consenso entre os especialistas.
d) Os fenômenos envolvidos não são bem compreendidos; modelos são inexistentes ou conhecidos/acreditados por fornecer previsões inadequadas.

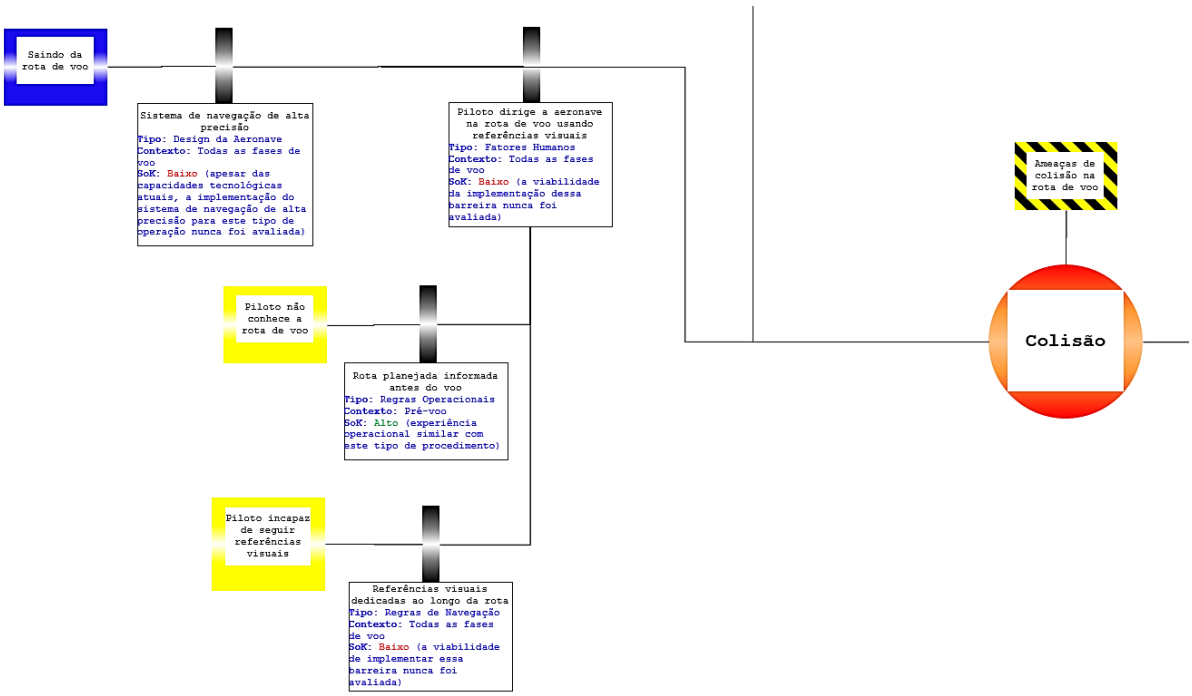


Figura 1 – Bowtie do risco de colisão de um WIG: riscos ou ameaças

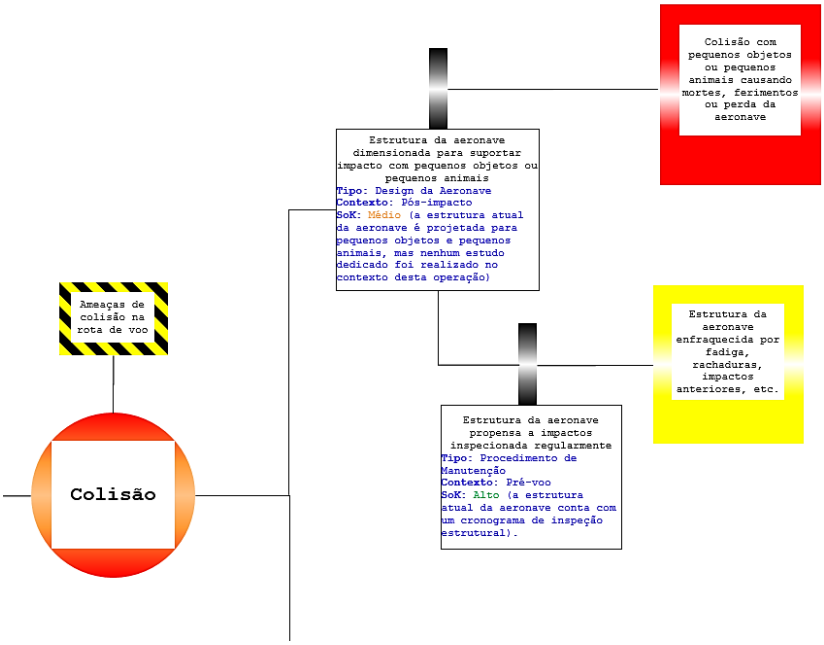


Figura 2 – Bowtie do risco de colisão de um WIG: evento de interesse e consequências

Apenas uma parte do diagrama de Bowtie foi incluída no artigo, pois o diagrama completo é muito grande e dificultaria a visualização completa. As ameaças identificadas pela Figura 1 são a saída da rota de voo, devido à falta de sistemas de navegação de alta precisão e falhas na direção visual, e a desconhecimento da rota pelo piloto, bem como a incapacidade do piloto de seguir referências visuais. Estas ameaças destacam a necessidade de desenvolver e testar sistemas de navegação mais precisos e referências visuais dedicadas para minimizar os riscos de colisão.

Algumas das consequências potenciais da colisão, como mostra a Figura 2, incluem danos à estrutura da aeronave que podem resultar em mortes, ferimentos ou perda da aeronave. A análise identificou que a estrutura da aeronave é projetada para resistir a impactos com pequenos objetos e animais, mas ainda não foram realizados estudos específicos para este contexto operacional. Além disso, a estrutura da aeronave pode ser enfraquecida por fadiga, rachaduras e impactos anteriores, aumentando o risco de falhas catastróficas. Medidas de mitigação incluem a inspeção regular da estrutura da aeronave antes do voo para identificar e reparar danos estruturais.

Esta análise permitiu a visualização das causas principais do risco, as barreiras preventivas para evitar sua ocorrência, as consequências potenciais e as medidas de mitigação para reduzir o impacto caso o risco se materialize. Assim, foi possível obter uma compreensão abrangente e detalhada do cenário de risco, permitindo a implementação de medidas preventivas e reativas mais eficazes. Além disso, o método Bowtie pode ser complementado em futuros trabalhos com outras metodologias de quantificação de riscos, potencializando ainda mais a gestão de riscos.

Outra vantagem importante do método Bowtie é a facilitação da comunicação entre diferentes *stakeholders* envolvidos na gestão de riscos. Ao usar um diagrama intuitivo, o método torna-se mais fácil para profissionais de diferentes áreas compreenderem e discutirem os riscos identificados, colaborando de forma mais eficaz na implementação de medidas preventivas e corretivas.

Apesar de suas vantagens, foi visto que o método também apresenta desafios e limitações que podem impactar sua aplicação e eficácia na gestão de riscos. Uma das limitações do método está relacionada à sua capacidade de lidar com a complexidade e o detalhamento dos riscos em certos cenários. Em situações onde há uma grande variedade de eventos potenciais e múltiplas barreiras de proteção, o diagrama Bowtie pode se tornar excessivamente complexo e difícil de interpretar, o que pode limitar sua utilidade prática. Outro desafio visto junto ao Bowtie é a atualização contínua e a revisão periódica do diagrama para garantir sua relevância e precisão ao longo do tempo, os riscos e as barreiras de controle podem evoluir com o tempo.

5. CONCLUSÕES

Este estudo explorou os riscos e os benefícios da integração de veículos de efeito solo no sistema de transporte da Amazônia, destacando suas vantagens estratégicas em relação aos métodos convencionais. Os veículos WIG têm o potencial de revolucionar o acesso a comunidades remotas, proporcionando uma logística mais rápida e confiável para o transporte de passageiros, mercadorias e serviços de emergência.

A análise de riscos realizada utilizando a Análise Preliminar de Perigos (PHA) e o método Bowtie permitiu identificar e avaliar os principais perigos e desenvolver medidas de mitigação adequadas. No entanto, a falta de estudos específicos sobre a utilização de veículos de efeito solo na região amazônica apresentou desafios, levando à necessidade de complementar as atribuições de probabilidade com a força dos julgamentos de conhecimento (*Strength of Knowledge - SoKs*).

Os resultados deste estudo sublinham a importância de uma abordagem cuidadosa e bem-informada na introdução de novas tecnologias em contextos complexos e desafiadores como a Amazônia. Além das vantagens operacionais, como maior eficiência aerodinâmica e menor consumo de combustível, a capacidade de operar em áreas com infraestrutura limitada torna os veículos WIG uma solução promissora para superar os obstáculos naturais e logísticos da região. A aplicação da metodologia Bowtie revelou que, embora existam riscos significativos, as medidas de mitigação propostas podem reduzir esses riscos a níveis aceitáveis.

Futuras pesquisas devem focar na coleta de dados adicionais e na realização de estudos de caso específicos para melhorar a compreensão dos riscos e das melhores práticas operacionais para veículos de efeito solo na Amazônia. Além disso, é essencial desenvolver políticas públicas e regulamentações que facilitem a implementação segura e eficiente desta tecnologia inovadora. Recomenda-se continuar explorando a integração do Método Bowtie com outras técnicas de análise de risco, como HAZOP *(Hazard and Operability Study)*, FMEA *(Failure Modes and Effects Analysis*) e FTA *(Fault Tree Analysis)*. Essa integração pode oferecer várias vantagens adicionais na gestão de riscos e acrescentaria novas perspectivas para a qualificação da viabilidade técnica de projetos.

6. REFERENCES

Aven, Terje. *Practical implications of the new risk perspectives.* Reliability Engineering and System Safety, [s.l.], v. 115, p. 136-145, 2013.

Askeland, Tore; Flage, Roger; Aven, Terje. *Moving beyond probabilities – Strength of knowledge characterisations applied to security*. Reliability Engineering and System Safety, [s.l.], v. 217, p. 108061, 2022.

Guohai, Y. et al. (2024) *Study on quantitative evaluation method for failure risk factors of the high-temperature and high-pressure downhole safety valve.* Sustainability, v. 1, n. 1896, p. 16(5).

ABNT. (2020). *NBR 9050:2015 Acessibilidade a edifcações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos.* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Kerckhoffs, M.; Sluijs, A. van der; Binnekade, J. (2013) *Improving patient safety in the icu by prospective risk analysis model.* Patient Saf, v. 1, n. 1, p. 9(3).

Rozhdestvensky, K. V. (2006) *Wing-in-ground effect* vehicles. Progress in Aerospace Sciences, v. 42, n. 3, p. 211-283.

Sinitsyn, D., & Maskalik, A. (1996). *The Ekranoplan is a New Type of High Speed Water Transport Which can be Used in All Seasons*. Proceedings of Ekranoplans and Very Fast Craft, (pp.152 - 161). Sydney: The Institute of Marine Engineers (Sydney Branch).

Yin, Cheong Ming; Wiriadidjaja, Surjatin; Abd Majid, Dayang Laila; Romli, Fairuz Izzudin bin; Shakrine, Azmin; Rafie, Mohd Rafie; Zhahir, Amzari. *Review on the cost and performance of a wige craft: a commercialization prospective.* ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 10, n. 21, p. 10027–10029, 2015.