

Marinha do Brasil
Escola de Guerra Naval
Doutorado Profissional em Estudos Marítimos

Edilson Cezar Corrêa

Sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas: viabilidade da integração
tecnológica e institucional no contexto da Marinha do Brasil

Rio de Janeiro
2025

Edilson Cezar Corrêa

Sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas: viabilidade da integração
tecnológica e institucional no contexto da Marinha do Brasil

Relatório Técnico-Científico apresentado como
Trabalho de Conclusão de Doutorado
Profissional apresentado ao Programa de Pós-
Graduação em Estudos Marítimos como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título
de Doutor em Estudos Marítimos.
Área de Concentração em Defesa, Governança
e Segurança Marítimas.

Orientador: William de Sousa Moreira

Rio de Janeiro
2025

C824s Corrêa, Edilson Cezar

Sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas:
viabilidade da integração tecnológica e institucional no contexto
da Marinha do Brasil / Edilson Cezar Corrêa. – Rio de Janeiro, 2025.

200f. il.

Relatório técnico (doutorado) - Escola de Guerra Naval, Programa de Pós-graduação em Estudos Marítimos (PPGEM), 2025.

Orientador: William de Sousa Moreira.

Bibliografia: f.174-196.

1. Defesa nacional 2. Estratégia marítima. 3. Estratégia naval 4. Sistema de armas autônomas letais. 5. Tecnologia – Autonomia tecnológica I. Escola de Guerra Naval (BRASIL). II. Título.

CDD: 623.7464

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária
Marjourie Andreza de Araujo Cruz Marques – CRB7/6818
Biblioteca da Escola de Guerra Naval

EDILSON CEZAR CORRÊA

Sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas: viabilidade da integração tecnológica e institucional no contexto da Marinha do Brasil

Relatório Técnico-Científico apresentado como Trabalho de Conclusão de Doutorado Profissional apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Estudos Marítimos.
Área de Concentração em Defesa, Governança e Segurança Marítimas.

Aprovado em 24 de novembro de 2025.

Banca Examinadora

Prof. Dr. William de Sousa Moreira
Doutor da Escola de Guerra Naval

Prof. Dr. Adriano Lauro
Doutor da Escola de Guerra Naval

Prof. Dr. Charles Pacheco Piñon
Doutor da Escola de Guerra Naval

Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida
Doutor do Centro Federal de Educação Tecnológica

Prof. Dr. Marcio Rocha
Doutor da Universidade Federal Fluminense

*Aos meus pais (in memoriam)
pela dedicação, amor e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor William Moreira, pela orientação, estímulo e paciência.

À Escola de Guerra Naval, pela oportunidade de cursar o Doutorado em Estudos Marítimos e pelo ambiente acadêmico que tornou possível a realização desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos, pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências.

Aos colegas da Secretaria do curso, em especial à Tenente Brenda e ao Suboficial Valdir, sempre atenciosos nos atendimentos.

Aos especialistas entrevistados, pela disponibilidade de tempo e pelas contribuições ao desenvolvimento desta pesquisa.

À Comandante Jacqueline, pelo incentivo e suporte no primeiro ano do curso.

Ao Engenheiro Rigel, pelas orientações iniciais e pelo apoio.

À Engenheira Cláudia Torquato, sempre disposta a auxiliar com a experiência adquirida neste mesmo curso.

Ao Comandante Cardoso, pelas sugestões e contribuições valiosas ao longo do trabalho.

À Engenheira Cláudia Reis, pela constante disponibilidade para ajudar e incentivar.

Às minhas irmãs Ana, Márcia e Cláudia, pelo incentivo nas horas difíceis.

Aos meus filhos, pelo amor e pela compreensão ao longo desta jornada.

RESUMO

Este relatório técnico analisa, de forma aprofundada, as condições técnicas, operacionais e institucionais para a integração de tecnologias autônomas letais em Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP), com ênfase no contexto da Marinha do Brasil e na defesa da Amazônia Azul. A metodologia combinou revisão teórica e documental, análise do estado da arte tecnológico, análise das capacidades nacionais relevantes e entrevistas com representantes da tríplice hélice, Forças Armadas, Base Industrial de Defesa e instituições acadêmicas. O estudo abordou os conceitos fundamentais de autonomia e letalidade delegada, as distinções entre automação e autonomia, os níveis funcionais de decisão embarcada, os desafios técnicos e energéticos, além das tendências internacionais relacionadas a plataformas armadas com inteligência artificial embarcada. A análise também revelou as principais limitações do cenário nacional, como a dependência externa de componentes críticos, a fragmentação institucional e a ausência de protocolos normativos robustos, ao mesmo tempo em que identificou potencialidades expressivas em sensores embarcados, arquitetura de sistemas, integração operacional e pesquisa aplicada em universidades e centros de excelência. Os resultados indicam que, embora o Brasil ainda não possua SARP armados com funções letais autônomas, há iniciativas promissoras em andamento que, se articuladas de forma coordenada, podem tornar viável a adoção progressiva dessas capacidades no médio prazo. O relatório conclui que a integração de tecnologias autônomas letais é factível, mas depende de ações estratégicas nos campos regulatório, tecnológico e institucional. Recomenda-se, por fim, a formulação de políticas públicas voltadas ao uso dual, à capacitação de recursos humanos e à consolidação de uma estratégia nacional de tecnologias autônomas voltadas à defesa.

Palavras-chave: Sistemas de Armas Autônomas Letais, SARP, autonomia tecnológica, Marinha do Brasil, Base Industrial de Defesa, Amazônia Azul.

ABSTRACT

This technical report provides an in-depth analysis of the technical, operational, and institutional conditions required for the integration of lethal autonomous technologies into Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), with emphasis on the Brazilian Navy and the defense of the Blue Amazon. The methodology adopted combined theoretical and documentary review, state-of-the-art technological analysis, analysis of relevant national capabilities, and interviews with representatives from the triple helix, the Armed Forces, Defense Industrial Base, and academic institutions. The study addressed key conceptual distinctions between automation and autonomy, functional levels of decision-making, embedded artificial intelligence, and the delegation of lethal force in autonomous systems. It also examined the technological and energy-related challenges associated with long-endurance missions in maritime environments and explored international trends in AI-based armed platforms. Findings reveal that, although Brazil does not yet possess RPAS equipped with lethal autonomous capabilities, there are promising national initiatives in the areas of sensor integration, system architecture, and applied research. At the same time, the study identifies critical obstacles, such as dependence on imported components, institutional fragmentation, and the absence of national validation protocols. The research concludes that the adoption of lethal autonomous systems is technically feasible in the medium term, provided strategic investments are made in regulatory frameworks, civil-military cooperation, and national innovation systems. The report recommends the development of public policies oriented toward dual-use technologies, human resource development, and the establishment of a national strategy for autonomous defense technologies.

Keywords: Lethal Autonomous Weapon Systems, RPAS, technological autonomy, Brazilian Navy, Defense Industrial Base, Blue Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camadas funcionais de autonomia em sistemas aéreos armados.....	37
Figura 2 - Escala de autonomia operacional em sistemas militares.....	40
Figura 3 - Modelo ALFUS de avaliação da autonomia de sistemas robóticos.....	41
Figura 4 - Dados de treinamento rotulados e não rotulados.....	57
Figura 5 - MQ-9 Reaper (EUA): Plataforma MALE.....	60
Figura 6 - Bayraktar TB2 (Turquia): Drone tático de médio alcance.....	61
Figura 7 - Plataforma Bayraktar Akinci (Turquia).....	62
Figura 8 - IAI Harop (Israel).....	63
Figura 9 - Wing Loong II (China): Sistema com e múltiplos sensores embarcados.....	63
Figura 10 - Integração de Sensores em um SARP com funções autônomas.....	86
Figura 11 - Estrutura Analítica de Projeto (EAP) de Drone Aéreo Autônomo Armado.....	91
Figura 12 - Estimativa comparativa de consumo energético.....	95
Figura 13 - Estimativa de área varrida por drones armados com 20 km de faixa sensorial.....	96
Figura 14 - Vetores de ataque cibernético em sistemas aéreos remotamente pilotados.....	109
Figura 15 - Desafios operacionais de SARP em ambiente marítimo.....	120
Figura 16 - Nauru 1000C: SARP nacional com potencial de armamento autônomo.....	132
Figura 17 - Eixos Estratégicos para o Desenvolvimento de SARP com SAAL.....	167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de SARP por categoria.....	31
Quadro 2 - Exemplos de definições de SAAL segundo países e organização.....	33
Quadro 3 - Comparativo entre Automação e Autonomia em Sistemas Militares.....	38
Quadro 4 - Diferenças entre Drones Armados e SARP com Funções Autônomas.....	43
Quadro 5 - Marcos Conceituais do Debate no âmbito do GGE/CCW (2014–2019).....	45
Quadro 6 - Comparativo entre SARP letais de referência internacional.....	83
Quadro 7 - Sensores e Tecnologias Embarcadas em SARP com Funções Autônomas.....	86
Quadro 8 - Empresas, Países de Origem e Especializações Tecnológicas.....	93
Quadro 9 - Comparação das plataformas brasileiras com potencial de adaptação.....	134
Quadro 10 - Convergências e assimetrias entre os setores da tríplice hélice.....	156
Quadro 11 - Conexões entre Capítulos e Entrevistas.....	159

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIMDE	Associação Brasileira das Indústrias de Materiais de Defesa e Segurança
ALFUS	<i>Autonomy Levels for Unmanned Systems</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
BID	Base Industrial de Defesa
BVLOS	<i>Beyond Visual Line of Sight</i>
C4ISR	<i>Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
CCW	<i>Convention on Certain Conventional Weapons</i>
CEPE-MB	Centro de Estudos Político-Estratégicos da Marinha
CICV	Comitê Internacional da Cruz Vermelha
CNAS	<i>Center for a New American Security</i>
COMINT	<i>Communications Intelligence</i>
COTS	<i>Commercial Off-The-Shelf</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DIH	Direito Internacional Humanitário
END	Estratégia Nacional de Defesa
EGN	Escola de Guerra Naval
ELINT	<i>Electronic Intelligence</i>
EMA	Estado-Maior da Armada
EO	<i>Electro-Optical</i>
EVLOS	<i>Extended Visual Line of Sight</i>
FAB	Força Aérea Brasileira
FANET	<i>Flying Ad Hoc Networks</i>
FA	Forças Armadas
GGE	<i>Group of Governmental Experts</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IA	Inteligência Artificial
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IME	Instituto Militar de Engenharia
INS	<i>Inertial Navigation System</i>

IR	<i>Infrared</i>
ISR	<i>Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance</i>
ITAR	<i>International Traffic in Arms Regulations</i>
LAWS	<i>Lethal Autonomous Weapon Systems</i>
LBDN	Livro Branco de Defesa Nacional
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MB	Marinha do Brasil
MD	Ministério da Defesa
MRE	Ministério das Relações Exteriores
OFFSET	<i>Offensive Swarm-Enabled Tactics</i>
OM	Organizações Militares
OMS	<i>Open Mission Systems</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PEM	Plano Estratégico da Marinha
PND	Política Nacional de Defesa
SAAL	Sistemas de Armas Autônomas Letais
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SARP	Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SATCOM	<i>Satellite Communications</i>
SIGINT	<i>Signals Intelligence</i>
SisGAAz	Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul
SIPRI	<i>Stockholm International Peace Research Institute</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aircraft Systems</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNIDIR	<i>United Nations Institute for Disarmament Research</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLOS	<i>Visual Line of Sight</i>
VTOL	<i>Vertical Take-Off and Landing</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
1 CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
1.1 Conceitos-chave.....	27
1.1.1 Drone e Sistemas Não Tripulados.....	29
1.1.2 SARP – Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas.....	30
1.1.3 Armas Autônomas Letais.....	33
1.1.4 Automação vs. Autonomia.....	35
1.1.5 Níveis de Autonomia	39
1.1.6 Drones Armados Convencionais vs. SARP com Funções Autônomas.....	42
1.2 Regulamentação e Debates Internacionais	43
1.3 Revisão da Literatura	48
1.3.1 Marcos teóricos e tendências tecnológicas	49
1.3.2 Sensores e percepção do ambiente	52
1.3.3 Inteligência Artificial Embarcada	54
1.3.4 Arquiteturas e desafios operacionais	57
1.3.5 Plataformas aéreas internacionais de referência	59
1.3.6 Lacunas e oportunidades na literatura nacional.....	64
1.3.7 Considerações sobre uso dual e implicações estratégicas	66
1.4 Diretrizes e Documentos Estratégicos da Defesa Brasileira.....	68
1.5 Considerações finais do Capítulo 1	70
2 CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE.....	72
2.1 Sistemas Atuais e Tendências	72
2.1.1 Avanços em Sistemas Autônomos Aéreos de Emprego Militar	73
2.1.2 Lições de Conflitos Recentes: Ucrânia, Cáucaso e Oriente Médio	75
2.1.3 Enxames de Drones e Inteligência Coletiva	77
2.1.4 Situação Nacional e Capacidade Industrial Brasileira.....	80
2.1.5 Considerações Finais sobre as Tendências Tecnológicas	81
2.2 Sensores e Tecnologias Embarcadas.....	83
2.3 Cadeia Industrial Global e Fragmentação Tecnológica	89
2.4 Energia e Autonomia	94
2.5 Considerações finais do Capítulo 2	97
3 CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO TECNOLÓGICA.....	99

3.1	Desafios da Integração.....	100
3.1.1	Complexidade Técnica e Arquitetura de Sistemas	101
3.1.2	Cerceamento Tecnológico e Dependência Externa.....	103
3.1.3	Barreiras Operacionais e de Interoperabilidade.....	105
3.1.4	Vulnerabilidades Cibernéticas e Falhas de Segurança.....	108
3.1.5	Formação de Recursos Humanos e Integração da Tríplice Hélice	111
3.1.6	Considerações parciais sobre a integração tecnológica	115
3.2	Viabilidade Técnica e Operacional	119
3.2.1	Adaptação ao Ambiente Marítimo e Reconfiguração Modular	119
3.2.2	Táticas de Resiliência e Operação em Ambiente Contestável.....	123
3.2.3	Operação com Supervisão Humana Reduzida.....	125
3.3	Adaptação de Modelos Existentes	127
3.3.1	Modelos Internacionais Relevantes e Estratégias de Adaptação	128
3.3.2	O Caso Brasileiro: Nauru, Plataformas Nacionais e Limitações Tecnológicas	131
3.3.3	Desafios Ambientais e Doutrinários para a Adaptação Operacional	135
3.3.4	Caminho Estratégico: Capacitação Nacional e Autonomia Gradual	139
3.4	Conclusão do Capítulo 3.....	142
4	CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	144
4.1	Considerações Metodológicas	144
4.2	Eixos de Percepção: Interesses, Capacidades e Riscos.....	145
4.2.1	Percepção e Interesse Estratégico	145
4.2.2	Capacidades técnicas e recursos humanos.....	148
4.2.3	Articulação Institucional e Cooperação	151
4.2.4	Riscos, Desafios e Barreiras	153
4.3	Síntese da Tríplice Hélice: Convergências e Assimetrias.....	155
4.4	Conexões com os Capítulos Anteriores	157
5	CONCLUSÃO.....	161
5.1	Recomendações	165
5.2	Limitações da pesquisa	168
5.3	Perspectivas para pesquisas futuras	168
5.4	Considerações finais	169
	REFERÊNCIAS	174
	GLOSSÁRIO.....	197
	APÊNDICE – Questionário para a Tríplice Hélice	199

INTRODUÇÃO

Desde a Antiguidade, diferentes sociedades buscaram desenvolver meios para evitar o combate corpo a corpo, visando proteger seus combatentes. Ao longo da história da guerra, observa-se uma tendência recorrente à ampliação da distância entre o combatente e a ameaça, associada ao uso crescente de tecnologias capazes de aumentar a precisão, a letalidade e a capacidade de decisão informada no campo de batalha, em distintos contextos civilizacionais (Magnoli, 2006). Ao longo desses ciclos tecnológicos, uma constante se mantém: a tentativa de ampliar a distância entre o combatente e a ameaça, ao mesmo tempo em que se aumenta a precisão, a letalidade e a capacidade de decisão informada no campo de batalha.

Com o intuito de aprimorar o desempenho dos meios de combate, o desenvolvimento militar passou a incorporar processos de análise eletrônica em diversas atividades, como a correção de trajetória de deslocamento, a detecção de alvos e o aperfeiçoamento da pontaria. Essa automação não apenas minimiza o erro humano, como também permite que os operadores dediquem maior atenção à tomada de decisões estratégicas durante o engajamento (Revels, 2023).

O avanço das tecnologias de telecomunicações possibilitou a execução remota de diversas tarefas, permitindo que operações críticas fossem realizadas com precisão por equipes especializadas. Essa evolução otimizou o desempenho operacional e facilitou a tomada de decisões em tempo real¹.

Um exemplo notável dessa abordagem tecnológica foi o projeto Apollo da NASA, no qual sistemas de telemetria foram amplamente utilizados para o controle remoto de tarefas como o fornecimento de dados de posição e trajetória da espaçonave, bem como a transmissão de informações dos sistemas críticos, incluindo propulsão, controle de atitude, suporte à vida e geração de energia (Murray; Cox, 1989).

Contudo, a operação remota de sistemas técnicos empregados em atividades militares, incluindo plataformas aéreas não tripuladas e seus sistemas de comando e controle, apresenta vulnerabilidades, como o atraso na transmissão de sinais e a possibilidade de interrupção das comunicações, o que pode comprometer o apoio remoto e resultar em ações operacionais às cegas. Para mitigar tais riscos, buscou-se desenvolver sistemas com capacidade de

¹ No contexto deste trabalho, o termo “tempo real” refere-se à capacidade de processamento, transmissão e apresentação de informações com latência suficientemente reduzida para permitir a tomada de decisão operacional dentro da janela temporal relevante da missão, não implicando ausência total de atraso ou simultaneidade perfeita entre evento, processamento e ação.

processamento local de dados, tomada de decisão em tempo real e independência da participação humana direta.

No contexto da IV Revolução Industrial, caracterizada pela convergência de tecnologias digitais, físicas e biológicas, a inteligência artificial (IA) desponta como protagonista, possibilitando reduzir ainda mais a exposição dos combatentes aos riscos do campo de batalha. A capacidade de processar dados e tomar decisões em tempo real, mesmo em ambientes caracterizados por múltiplas variáveis e critérios de decisão complexos, criou uma janela de oportunidade para o emprego de sistemas e subsistemas automatizados, com reduzida necessidade de intervenção humana (Schwab, 2016).

Os veículos autônomos, com ou sem a intervenção remota de um operador, representam uma das principais aplicações militares das tecnologias emergentes da IV Revolução Industrial, com crescente incorporação de IA. Desde a década de 1990, aeronaves remotamente pilotadas vêm sendo amplamente utilizadas em operações militares e têm evoluído para patamares de autonomia cada vez mais elevados. Um dos desafios contemporâneos reside no desenvolvimento de aeronaves capazes de substituir os modelos tripulados em operações a partir de porta-aviões, ampliando a flexibilidade e a projeção de poder naval (Moura, 2019).

O emprego de tecnologias dotadas de IA, em especial no desenvolvimento de sistemas de armas autônomas letais (*Lethal Autonomous Weapon Systems* – LAWS), suscita debates éticos relevantes e levanta implicações jurídicas para o Direito Internacional Humanitário (DIH) e para a Base Industrial de Defesa (BID) brasileira. O Comitê Internacional da Cruz Vermelha (CICV) define os sistemas de armas autônomas como “qualquer sistema de armas que possua autonomia em suas funções críticas, ou seja, que possa selecionar (buscar, detectar, identificar e rastrear) e atacar (interceptar, neutralizar, danificar ou destruir) alvos sem intervenção humana” (CICV, 2023).

Neste trabalho, será adotada a sigla SAAL, Sistemas de Armas Autônomas Letais ou simplesmente “armas autônomas” para designar os sistemas internacionalmente conhecidos pela sigla LAWS. A escolha pela terminologia em português busca alinhar a linguagem técnica à doutrina nacional e evitar o uso excessivo de anglicismos, sem prejuízo ao diálogo com a literatura internacional.

O Departamento de Defesa dos Estados Unidos define sistema de armas autônomas letais como “um sistema de armas que, uma vez ativado, pode selecionar e engajar alvos sem intervenção adicional de um operador humano”. Essa definição inclui sistemas supervisionados por humanos, projetados para permitir que o operador possa intervir, mas que, após a ativação, possuem capacidade de selecionar e atacar alvos de forma independente (Noone; Noone, 2015).

Os conflitos armados do século XXI, especialmente na Europa e no Oriente Médio, têm evidenciado o emprego de novas tecnologias de combate voltadas à identificação de ameaças e ao engajamento de alvos, com destaque para o uso de drones aéreos². Esses sistemas reduzem o número de combatentes expostos diretamente ao confronto, além de ampliar a capacidade de coleta de dados e, conseqüentemente, de tomada de decisão em tempo real.

Plataformas bélicas, como drones aéreos, são capazes de sair de suas bases, deslocar-se para o teatro de operações, buscar e identificar alvos, persegui-los e atacá-los, podendo retornar, ou não, às suas bases. Todo esse processo pode ocorrer sem a necessidade de autorização humana em tempo real, embora dependa de programação prévia definida pelos operadores (Hartmann; Steup, 2013).

Entretanto, o aumento da autonomia operacional também traz riscos. Sistemas de armas autônomas são potencialmente vulneráveis a ataques cibernéticos, que poderiam permitir a tomada de controle da arma pelo inimigo. Tal ameaça evidencia que apenas aqueles que dominam todas as etapas da cadeia produtiva, do projeto ao desenvolvimento e integração, possuem capacidade efetiva de prevenir-se contra interferências externas (*United Nations Institute for Disarmament Research* - UNIDIR, 2015; Wyatt, 2023).

Além disso, sistemas atualmente dependentes da interação humana poderiam ser reprogramados para agir de forma completamente autônoma, desde o reconhecimento da ameaça até o disparo da munição, sem a necessidade de autorização por parte de um operador. Diante desse cenário, esforços internacionais, especialmente no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU), vêm sendo realizados no sentido de discutir a regulamentação, a limitação ou até a proibição dessas tecnologias, com reflexos políticos, humanitários e econômicos (ONU, 2024, A/79/88)

Uma questão fundamental nesse debate refere-se à responsabilidade jurídica pelo emprego das armas autônomas em eventual violação ao Direito Internacional Humanitário. A responsabilização poderia alcançar não apenas o operador militar, mas também os fabricantes e programadores envolvidos na concepção dos sistemas. Esse debate jurídico permanece em evolução e se articula com discussões sobre supervisão humana significativa, previsibilidade comportamental dos sistemas e governança de algoritmos de aprendizado (Bo *et al.*, 2022; CICV, 2023).

² O termo “drone”, amplamente difundido no meio civil, refere-se a veículos não tripulados que operam em diversos domínios, aéreo, de superfície e subaquático. Neste trabalho, o foco recai sobre drones aéreos, em particular aqueles empregados em ambiente marítimo.

Para debater a possível normatização das armas autônomas e obter subsídios para as negociações, o Ministério da Defesa (MD) e o Ministério das Relações Exteriores (MRE), em parceria com o Centro de Estudos Político-Estratégicos da Marinha (CEPE-MB) e a Escola de Guerra Naval (EGN), realizaram o colóquio sobre armas autônomas em abril de 2019. O evento contou com representantes de Organizações Militares (OM) da MB afetadas pelo tema, de indústrias brasileiras de defesa e de instituições de ensino e pesquisa. Enfatizou-se a importância de que os representantes do Brasil nas negociações tenham conhecimento relevante para debater uma possível convenção internacional sobre armas autônomas e não perder a “janela de oportunidade” de desenvolvimento tecnológico. Iniciativas desse tipo indicam que a discussão nacional não se restringe ao plano ético e jurídico, mas também considera trajetórias tecnológicas e requisitos de capacitação industrial.

No cerne das discussões atuais está a responsabilidade dos programadores no desenvolvimento de software, dos comandantes em teatros de operações e do Estado, diante da possibilidade de falhas na antecipação das vulnerabilidades dos sistemas (Bo *et al.*, 2022; CICV, 2023). Falhas podem colocar em risco vidas humanas e comprometer missões críticas. É imprescindível estabelecer protocolos rigorosos de teste e validação para mitigar tais riscos e garantir a segurança operacional dos sistemas autônomos (Devitt, 2023; Helmer *et al.*, 2024).

Esse esforço engloba desde a especificação de requisitos funcionais e de segurança até práticas de engenharia segura, auditorias independentes, simulações em larga escala e exercícios controlados em ambientes reais, com métricas transparentes de desempenho e de confiabilidade.

A área de ciência e tecnologia brasileira parece seguir com esforços isolados em áreas importantes para a construção de armas autônomas. Esse tipo de desenvolvimento constitui-se como um processo de inovação incremental, que poderia ser qualificado ainda como inovação fragmentada, por não atender ao desenvolvimento de sistemas de armas autônomas letais de forma integral. As inovações tecnológicas consideradas relevantes na defesa, durante as últimas décadas, incluem a construção de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas autóctones, sensoriamento óptico e acústico (Fernandes *et al.*, 2017), e novas armas, como armas a laser.

Entre os fatores que mais impulsionam o interesse pelo desenvolvimento de armas autônomas no Brasil, destaca-se a necessidade estratégica de reduzir a histórica dependência tecnológica em relação a países estrangeiros, o que, por sua vez, fortalece a autonomia nacional em matéria de defesa (Amarante, 2012). Como qualquer tecnologia avançada, tais sistemas podem estar sujeitos a controles externos se forem adquiridos de fornecedores internacionais. Isso inclui a possibilidade de comandos remotos pelo fabricante ou interferência por parte dos

fabricantes de componentes críticos. Assim, a capacitação nacional em integração de sistemas complexos e a capacidade de certificação independente surgem como dimensões essenciais para mitigar riscos de dependência e para assegurar a soberania decisória sobre o emprego operacional dos meios.

O Brasil enfrenta um cenário de cerceamento tecnológico que dificulta o desenvolvimento e a integração de tecnologias autônomas avançadas em sistemas militares. Esse cerceamento se manifesta por meio de políticas internacionais de controle de exportação, acordos multilaterais que restringem o acesso a tecnologias críticas e a dependência de fornecedores internacionais para componentes e sistemas sensíveis. Nações desenvolvidas, como os Estados Unidos e os países-membros da União Europeia, impõem barreiras ao comércio de tecnologias de uso dual, como sistemas de inteligência artificial para aplicações militares (Moreira, 2013). Nesse ambiente, torna-se central identificar nichos de especialização viáveis, fomentar parcerias academicamente robustas e priorizar investimentos em áreas de maior impacto para o contexto marítimo brasileiro.

Cabe destacar que a criação do Esquadrão de Guerra Cibernética pela Marinha do Brasil (MB), conforme portaria do Comando da Marinha (BRASIL, 2024), sublinha a crescente importância da cibersegurança e da guerra cibernética nas operações militares contemporâneas. Esse movimento estratégico reforça a necessidade de adaptação às novas realidades do campo de batalha, onde a tecnologia da informação desempenha um papel central. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas de armas autônomas letais em plataformas de aeronaves remotamente pilotadas para operação no ambiente marítimo brasileiro ganha relevância adicional. A proteção de infraestruturas críticas, o monitoramento de áreas de interesse e a capacidade de resposta rápida a incidentes marítimos exigem soluções com alto grau de autonomia, robustez e interoperabilidade.

A justificativa para este relatório reside na importância estratégica de assegurar a capacidade autônoma de defesa no Brasil, promovendo o desenvolvimento nacional e evitando dependências tecnológicas externas, sobretudo em um cenário de guerra cibernética e de rápidas transformações tecnológicas. Em termos práticos, isso significa avaliar não apenas a disponibilidade de componentes e sistemas, mas também a maturidade de processos de integração, a existência de equipes capacitadas e a aderência a padrões de segurança e de confiabilidade compatíveis com o emprego militar em mar aberto.

O desenvolvimento de armas autônomas no Brasil deve ser entendido no contexto das ciências políticas, onde a governança, as políticas públicas e a segurança nacional são temas centrais. A implementação de armas autônomas pode alterar significativamente a dinâmica de

poder e a estratégia militar do país. Politicamente, o desenvolvimento dessa tecnologia requer uma abordagem coordenada que envolva múltiplos atores, incluindo o governo, a academia e a indústria de defesa, seguindo o modelo do tríplice hélice³ (Giraldo-Martinez, 2022).

A introdução de armas autônomas tem o potencial de fortalecer a capacidade de defesa do Brasil, oferecendo novos recursos para a vigilância e defesa de fronteiras, além de missões de combate. Entretanto, a adoção dessa tecnologia também pode gerar novas vulnerabilidades, como a dependência excessiva de sistemas tecnológicos complexos e a ameaça de ataques cibernéticos. A formulação de estratégias de mitigação de riscos e o investimento em cibersegurança serão fundamentais para garantir a integridade e a eficácia dos sistemas autônomos empregados.

No campo das relações internacionais, o desenvolvimento e o uso de armas autônomas têm implicações significativas para a paz e a segurança globais. A tecnologia de armas autônomas pode influenciar o equilíbrio de poder entre as nações, alterar as estratégias de dissuasão e desencadear novas corridas armamentistas.

O desenvolvimento de armas autônomas deve ser considerado no contexto dos tratados e convenções internacionais existentes, como a Convenção sobre Certas Armas Convencionais (CCW - *Convention on Certain Conventional Weapons*). O Brasil, como signatário da CCW, participa de todas as reuniões sobre armas autônomas e apoia a negociação de um instrumento legal vinculante (Automated Research, s.d.; ONU, 2024). A participação ativa em fóruns internacionais é essencial para garantir que as preocupações éticas e humanitárias sejam refletidas nas políticas globais.

A cooperação internacional em tecnologia de defesa pode representar uma estratégia para acelerar o desenvolvimento nacional e promover a transferência de conhecimento. Contudo, tais colaborações devem ser cuidadosamente geridas para evitar dependências tecnológicas e preservar os interesses estratégicos brasileiros.

A introdução de armas autônomas pode alterar o equilíbrio de poder regional e global. Para o Brasil, um país com ambições de liderança regional, o desenvolvimento de armas autônomas pode reforçar sua posição estratégica. No entanto, é crucial considerar as reações de outros países na região e no mundo. Políticas de transparência e confiança mútua são importantes para evitar mal-entendidos e escaladas de conflito. Políticas de transparência,

³ O termo “Tríplice Hélice” é empregado neste trabalho em consonância com o uso consolidado na literatura acadêmica em língua portuguesa para o modelo Triple Helix. Registra-se, contudo, que alguns autores adotam a expressão “Hélice Tríplice”, considerada tradução mais literal do termo original, conforme discutido por Etzkowitz e Zhou (2017).

medidas de fomento à confiança mútua e mecanismos de verificação podem reduzir incertezas regionais e contribuir para um ambiente de segurança mais estável.

O desenvolvimento de sistemas de armas autônomas letais embarcados em veículos aéreos não tripulados pela MB representa um passo estratégico que envolve considerações científicas, políticas e jurídicas. A adoção de armas autônomas possui o potencial de transformar as capacidades militares brasileiras, mas também impõe a necessidade de análise criteriosa quanto às implicações éticas, legais e estratégicas, que serão abordadas de forma subsidiária neste trabalho. Sobretudo, importa compreender a viabilidade técnica e operacional de integração de tecnologias autônomas letais em sistemas de aeronaves remotamente pilotados (SARP), levando em conta as particularidades do ambiente marítimo brasileiro.

A justificativa desta pesquisa decorre da identificação de lacunas relevantes na literatura nacional sobre sistemas de armas autônomas letais aplicados a plataformas aéreas, especialmente no que se refere à integração entre dimensões técnicas e institucionais no contexto brasileiro. Embora o debate internacional avance de forma significativa, os estudos nacionais ainda se concentram predominantemente em aspectos normativos, éticos ou conceituais, com pouca atenção à viabilidade tecnológica, à capacidade industrial instalada e às condições institucionais necessárias para a adoção desses sistemas. Nesse sentido, o presente trabalho busca contribuir para o preenchimento dessa lacuna ao analisar o tema sob uma perspectiva aplicada, orientada à realidade da Marinha do Brasil e às suas necessidades operacionais no ambiente marítimo.

Além disso, a originalidade do presente relatório reside no deslocamento analítico do debate predominantemente normativo e conceitual para uma abordagem aplicada, centrada na viabilidade técnica, operacional e institucional da integração de tecnologias autônomas letais em plataformas aéreas. Ao articular revisão do estado da arte, análise de capacidades nacionais e evidências empíricas obtidas por meio de entrevistas com representantes da trílice hélice, o estudo constrói um diagnóstico integrado que ainda é pouco explorado na literatura nacional. Essa combinação permite examinar não apenas o “se” tais sistemas podem ser adotados, mas sob quais condições técnicas, organizacionais e estratégicas essa adoção se torna plausível no contexto da Marinha do Brasil.

No que se refere aos impactos do relatório, a pesquisa produz implicações em diferentes planos. No plano acadêmico, o estudo se insere no debate nacional sobre tecnologias autônomas letais ao integrar dimensões técnicas e institucionais ainda pouco exploradas na literatura brasileira, predominantemente marcada por abordagens normativas ou conceituais.

No plano institucional e prático, o trabalho oferece subsídios à reflexão sobre políticas públicas e estratégias organizacionais no setor de defesa, ao explicitar riscos, limitações e oportunidades associados à adoção de tecnologias autônomas letais em plataformas aéreas, bem como ao identificar entraves técnicos e institucionais e possíveis caminhos para sua superação. Os impactos e implicações do relatório são retomados e aprofundados no item 5.4, à luz dos resultados obtidos ao longo da pesquisa.

Para fins deste relatório, a análise concentra-se em Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas voltados prioritariamente a tarefas de vigilância marítima persistente, reconhecimento, apoio à consciência situacional e monitoramento de áreas de interesse, no contexto da defesa do ambiente marítimo brasileiro. Não se pretende examinar o emprego desses sistemas em operações de ataque de alta intensidade ou em cenários de guerra convencional plena, mas sim avaliar sua viabilidade técnica, operacional e institucional para missões compatíveis com o estágio atual das capacidades nacionais.

A adaptação de SARP ao ambiente marítimo, conforme adotada neste relatório, não se limita a modificações físicas ou tecnológicas das plataformas. Ela envolve também dimensões doutrinárias, de treinamento e de manutenção em campo, que condicionam a viabilidade operacional e a sustentabilidade do emprego desses sistemas ao longo do tempo. Nesse sentido, a consolidação de capacidades aéreas autônomas adaptadas ao mar depende da articulação entre requisitos técnicos, preparo organizacional e capacidade de suporte logístico, envolvendo as Forças Armadas, a indústria e os centros de pesquisa nacionais.

Para fins de delimitação analítica, o trabalho concentra-se em SARP com potencial de emprego no ambiente marítimo, incluindo a possibilidade de operação a partir de meios navais. Essa opção implica considerar restrições específicas relacionadas a lançamento, recuperação, integração com plataformas embarcadas e operação sob condições de mar, vento e espaço limitado, o que diferencia substancialmente esses sistemas daqueles projetados exclusivamente para uso terrestre. A análise não pressupõe a maturidade plena dessas capacidades no contexto nacional, mas avalia em que medida tais requisitos condicionam a viabilidade técnica e operacional da integração de funções autônomas letais.

Ressalta-se que a análise não parte do pressuposto da existência atual de SARP plenamente autônomos e armados no Brasil, mas avalia as condições sob as quais tais capacidades poderiam ser desenvolvidas de forma gradual, segura e institucionalmente viável.

Este relatório não tem por objetivo analisar processos formais de obtenção, aquisição ou contratação de sistemas de defesa, os quais são tratados em normativos específicos da Marinha do Brasil, como o EMA-420. O foco do estudo concentra-se nas condições técnicas,

operacionais e institucionais associadas ao desenvolvimento e à integração de capacidades autônomas em SARP, entendidas como etapa anterior e complementar a eventuais decisões futuras no âmbito do ciclo de obtenção de meios.

Diante desse contexto, a questão de pesquisa que orienta este trabalho é: em que medida as capacidades nacionais disponíveis e os entraves tecnológicos e institucionais identificados permitem, no horizonte de médio prazo, a integração de tecnologias autônomas letais em SARP voltados ao ambiente marítimo, sob requisitos de vigilância persistente, enlaces seguros e operação em condições ambientais adversas?

Parte-se da hipótese de que, apesar das limitações impostas pelo cerceamento tecnológico e da dependência externa, o Brasil dispõe de capacidades científicas, industriais e institucionais que, a médio prazo, podem ser mobilizadas para desenvolver, integrar e operar sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas adaptadas ao contexto estratégico da MB. Essa hipótese será confrontada com evidências qualitativas, extraídas de documentos, entrevistas com especialistas e análise das capacidades nacionais e internacionais.

Do ponto de vista metodológico, este relatório adota uma abordagem qualitativa, de natureza aplicada, voltada à análise da viabilidade técnica e institucional da integração de tecnologias autônomas letais em Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas no contexto da MB. A pesquisa combina revisão conceitual e normativa, levantamento do estado da arte internacional, análise das capacidades nacionais e realização de entrevistas com representantes da tríplice hélice, abrangendo os setores governamental, industrial e acadêmico.

Essa estratégia metodológica permite compreender as interdependências entre requisitos técnicos, institucionais e estratégicos que influenciam a viabilidade, o ritmo e as condições de adoção dessas tecnologias, evitando abordagens simplificadoras e delimitando com clareza o escopo do objeto de estudo.

Os procedimentos metodológicos, os critérios de seleção das fontes, a condução das entrevistas e as limitações inerentes à pesquisa são apresentados de forma detalhada no Capítulo 4, especificamente no item 4.1 – Considerações Metodológicas, assegurando transparência, coerência analítica e rigor científico ao desenvolvimento do trabalho.

O relatório proposto integra o Curso de Doutorado Profissional em Estudos Marítimos, do Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos (PPGEM) da Escola de Guerra Naval, e apresenta aderência à área de concentração Defesa, Governança e Segurança Marítima, no âmbito da Área de Ciência Política e Relações Internacionais, com interface direta com a subárea de Estudos Estratégicos e de Defesa. Está vinculado à Linha de Pesquisa III, Política, Gestão e Logística em Ciência, Tecnologia e Inovação no Ambiente Marítimo, por tratar de

temas relacionados à gestão de CT&I, governança setorial e formulação de políticas públicas voltadas ao domínio marítimo.

Nesse enquadramento, o presente trabalho adota uma abordagem analítica própria dos Estudos de Defesa, com ênfase nas dimensões técnicas e institucionais associadas ao desenvolvimento e à integração de sistemas de armas autônomas letais, sem aprofundamento nas vertentes normativas ou ético-jurídicas do debate.

A pesquisa é apresentada sob a forma de relatório técnico-científico. A adoção desse formato corresponde ao caráter aplicado do curso e à natureza desta pesquisa, que examina a viabilidade da integração tecnológica e institucional de sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas no contexto da MB. O relatório técnico assume, assim, função prática, voltada à proposição de soluções de integração tecnológica e à análise de processos institucionais no campo da defesa.

A pesquisa mantém alinhamento com as Políticas e Estratégias Nacionais de Defesa, PND e a END, bem como com a Política Estratégica da Marinha do Brasil (PEM-2040), contribuindo para o fortalecimento da capacidade estatal de planejar, formular e implementar políticas públicas de defesa e inovação tecnológica. Também se articula às diretrizes das Portarias MEC nº 389/2017 (BRASIL, 2017) e CAPES nº 60/2019 (BRASIL, 2019a), que regulamentam os cursos de doutorado profissional, ao desenvolver um estudo de natureza aplicada, direcionado à geração de conhecimento técnico e institucional com potencial de apoio à formulação de políticas, programas estratégicos e iniciativas voltadas ao fortalecimento da Base Industrial de Defesa e das capacidades navais da MB.

Assim, será investigado quais são os condicionantes técnicos, operacionais e institucionais e os desdobramentos estratégicos associados à adoção de sistemas aéreos remotamente pilotados com funções autônomas letais para missões de patrulha de longa duração, monitoramento e resposta a ameaças no contexto da Amazônia Azul, considerando os limites da supervisão humana, da autonomia energética e da integração com sistemas navais existentes. Essa capacidade de reação imediata é vital para a proteção de infraestruturas críticas e de recursos naturais, bem como para o enfrentamento de atividades ilícitas, como a pesca ilegal, o tráfico de drogas e a pirataria, que representam riscos persistentes à soberania marítima brasileira (Nunes *et al.*, 2023; UNODC, 2022).

Com isso, definem-se os seguintes objetivos da pesquisa:

Objetivo geral:

- Analisar as condições técnicas, operacionais e institucionais existentes no Brasil, com ênfase na Marinha do Brasil e em sua articulação com a Base Industrial de Defesa e a comunidade científica, para a integração de tecnologias autônomas letais em sistemas aéreos remotamente pilotados voltados à defesa do ambiente marítimo brasileiro, no horizonte de médio prazo.

Objetivos específicos:

- Avaliar a maturidade e a capacidade de integração de sensores e sistemas embarcados em SARP nacionais.
- Analisar os impactos da autonomia energética sobre a operacionalidade de missões marítimas autônomas de longa duração.
- Investigar a viabilidade de adaptação de modelos internacionais ao contexto tecnológico e estratégico da MB.
- Identificar entraves institucionais e possíveis caminhos para a articulação entre governo, indústria e academia na integração de sistemas letais autônomos.

O trabalho foi organizado em cinco capítulos, assim resumidos:

O **Capítulo 1 – Fundamentação Teórica** apresenta os conceitos essenciais sobre sistemas autônomos letais e sistemas aéreos remotamente pilotados, abordando a diferença entre automação e autonomia, a regulamentação nacional e internacional vigente, bem como as principais discussões ocorridas em fóruns internacionais, como os promovidos pela ONU. Também realiza uma revisão crítica da literatura técnico-científica, identificando tendências tecnológicas e desafios operacionais. Por fim, analisa as diretrizes e documentos estratégicos da defesa brasileira relacionados ao tema.

O **Capítulo 2 – Estado da Arte** traça um panorama atualizado dos sistemas aéreos remotamente pilotados armados utilizados internacionalmente. Analisa as tecnologias embarcadas, como sensores ópticos, térmicos, radar e sistemas de fusão de dados, com destaque para o uso da inteligência artificial no reconhecimento de alvos e na tomada de decisão. Discute, ainda, as questões de autonomia energética e os desafios operacionais relacionados à cobertura de grandes áreas marítimas, como a Amazônia Azul.

O **Capítulo 3 – Desenvolvimento e Integração Tecnológica** aborda os desafios e possibilidades de integração de tecnologias autônomas letais em plataformas aéreas existentes.

Analisa obstáculos técnicos, questões de segurança cibernética e requisitos logísticos e estratégicos. Também explora a viabilidade de adaptação de modelos nacionais, como o sistema Nauru, para funções autônomas letais.

O **Capítulo 4 – Análise e Discussão** apresenta a interpretação dos dados obtidos em entrevistas semiestruturadas realizadas com representantes dos setores Governo/FA, BID e Academia. A análise foi estruturada em eixos temáticos que permitiram comparar percepções sobre interesses estratégicos, capacidades técnicas, articulação institucional e riscos, identificando convergências e assimetrias entre os setores. Essas percepções foram então confrontadas com os achados dos capítulos 2 e 3, permitindo verificar alinhamentos e divergências quanto às tendências tecnológicas, capacidades nacionais e desafios operacionais previamente discutidos. O capítulo sintetiza essas relações em quadros comparativos, evidenciando os fatores que favorecem ou limitam a integração de tecnologias letais autônomas em SARP no contexto marítimo brasileiro.

O **Capítulo 5 – Conclusão** sintetiza os resultados do relatório, confirmando que a integração de tecnologias letais autônomas em SARP para defesa marítima no Brasil é possível, desde que sustentada por planejamento articulado, investimentos consistentes e marcos normativos claros. Retoma e confirma o alcance dos objetivos gerais e específicos, identifica nós críticos como restrições energéticas, dependência de componentes importados e baixa integração entre setores, além de elementos de alavancagem como protótipos nacionais, capital científico e adesão crescente das Forças Armadas. Apresenta encaminhamentos estratégicos estruturados em três eixos interdependentes: experimentação operacional, certificação normativa e política de uso dual.

1 CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise dos sistemas de armas autônomas letais embarcados em aeronaves não tripuladas requer a apresentação de conceitos fundamentais, ainda que nem todos estejam plenamente consolidados na literatura ou nos fóruns internacionais. A diversidade de interpretações sobre autonomia, letalidade e controle humano exige o esclarecimento dos termos utilizados neste relatório, bem como a exposição dos principais debates teóricos, normativos e estratégicos que moldam o desenvolvimento e o possível emprego dessas tecnologias.

Este capítulo reúne os elementos teóricos e institucionais que fundamentam a proposta deste relatório técnico, distribuídos em quatro blocos temáticos complementares.

Inicialmente, são apresentados os conceitos-chave relacionados à pesquisa, com foco na distinção entre drones e sistemas aéreos remotamente pilotados, nas definições de armas autônomas letais, nos níveis de autonomia e nos critérios que distinguem sistemas automáticos de sistemas autônomos. Esse primeiro bloco é essencial para o enquadramento técnico do objeto de estudo.

Em seguida, são discutidas as regulamentações internacionais e os debates multilaterais em curso sobre o emprego de sistemas letais autônomos, permitindo compreender o posicionamento de diferentes Estados e o papel que o Brasil tem assumido nas instâncias de negociação, especialmente no âmbito das ONU.

O terceiro bloco trata dos estudos realizados no Brasil e no exterior sobre o tema, com ênfase nas principais contribuições teóricas, avanços tecnológicos, desafios operacionais identificados e lacunas existentes na literatura especializada.

O capítulo é encerrado com a apresentação das diretrizes e documentos estratégicos da defesa brasileira, que constituem o referencial institucional no qual deve se basear uma proposta de desenvolvimento ou adaptação tecnológica no setor de defesa.

Esses documentos expressam as prioridades, ameaças e oportunidades identificadas pelas Forças Armadas (FA) e pelo Estado brasileiro, servindo como base para avaliar a pertinência e a viabilidade do uso de sistemas autônomos no ambiente marítimo.

1.1 Conceitos-chave

O desenvolvimento de tecnologias aplicadas à defesa tem impulsionado a criação de plataformas com diferentes graus de autonomia, controle remoto e capacidade de combate. Para este trabalho, é necessário esclarecer os conceitos que sustentam a análise da integração de

SAAL a sistemas de aeronaves remotamente pilotadas, com base na doutrina militar e nos debates internacionais.

As Forças Armadas brasileiras utilizam a designação Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP) para se referir a plataformas aéreas operadas remotamente com finalidades específicas, como vigilância, inteligência, ataque e apoio logístico. Essa terminologia deriva do padrão adotado pela Organização da Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization* - ICAO), que formalizou o termo *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS) em sua Circular 328-AN/190, para designar aeronaves não tripuladas controladas por pilotos remotos, em oposição a sistemas não tripulados que operam sem controle humano direto (ICAO, 2011).

A padronização desses termos e a diferenciação entre o uso civil e militar têm implicações relevantes para a regulamentação, classificação e emprego tático dessas plataformas. As armas autônomas letais distinguem-se de sistemas automáticos ou teleguiados por incorporarem graus variáveis de percepção, decisão e ação sem intervenção humana direta, podendo identificar, selecionar e engajar alvos de forma autônoma em determinados níveis operacionais (Horowitz, 2016; Ágreda, 2020). O desenvolvimento desses sistemas exige a integração de sensores, inteligência artificial e arcabouço decisório compatível com as regras de engajamento estabelecidas.

É necessário, também, distinguir entre automação e autonomia. A automação executa tarefas pré-programadas de maneira previsível. A autonomia, por sua vez, envolve a capacidade de adaptação do comportamento com base na percepção do ambiente e em parâmetros táticos, exigindo uma arquitetura computacional mais avançada e maior independência decisória (Parasuraman *et al.*, 2000; UNITED STATES, 2012).

A essa autonomia operacional se somam os desafios da autonomia energética, que se refere à capacidade de uma plataforma permanecer em operação prolongada sem reabastecimento, fator crítico em cenários de amplo alcance marítimo, como a Amazônia Azul.

De acordo com Scharre (2018), a interação entre o ser humano e o sistema varia conforme o grau de autonomia e o desenho da missão, sendo geralmente classificada em três categorias:

- Homem-no-loop (*human-in-the-loop*): comando humano necessário para cada ação crítica;
- Homem-sobre-o-loop (*human-on-the-loop*): ação autônoma com supervisão ativa;
- Homem-fora-do-loop (*human-out-of-the-loop*): ação totalmente autônoma sem supervisão em tempo real.

Portanto, a escolha do modelo impacta diretamente o tipo de missão atribuível ao sistema.

A evolução dessas tecnologias tem gerado debates em fóruns internacionais quanto à sua legalidade, legitimidade e aceitabilidade. Estados com capacidades tecnológicas avançadas buscam liberdade para desenvolver e empregar tais sistemas, enquanto outros propõem restrições ou proibições preventivas. O Brasil tem adotado uma postura intermediária, defendendo a negociação de um instrumento internacional que equilibre o desenvolvimento tecnológico, os interesses de defesa e os princípios humanitários, considerando a possibilidade de aplicações civis e militares de uso dual (FUNAG, 2020).

1.1.1 Drone e Sistemas Não Tripulados

O termo “drone” tornou-se popular para designar aeronaves não tripuladas, embora sua origem remonte à década de 1930. A expressão foi empregada pelos britânicos com o modelo DH.82B Queen Bee, uma aeronave radiocontrolada utilizada como alvo para treinamento de artilharia antiaérea. O som característico do motor, semelhante ao zumbido de uma abelha, inspirou o nome drone, que em inglês também significa “zangão” (Newcome, 2004; Austin, 2010).

Em termos técnicos e operacionais, os drones são classificados em três categorias principais, segundo sua área de operação (UNITED STATES, 2011):

- UAV⁴ (*Unmanned Aerial Vehicle*): veículos aéreos não tripulados, englobando desde pequenos modelos civis até sistemas militares complexos.
- USV (*Unmanned Surface Vehicle*): veículos de superfície não tripulados, empregados em patrulha marítima, detecção de minas e coleta de dados oceanográficos.
- UUV (*Unmanned Underwater Vehicle*): veículos submarinos não tripulados, utilizados em missões de reconhecimento e mapeamento submarino.

Essas classificações são amplamente empregadas pelas FA e centros de pesquisa em defesa, refletindo a crescente diversidade e especialização dos sistemas não tripulados.

⁴ No contexto internacional, o termo *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) é utilizado para designar aeronaves não tripuladas. No Brasil, a denominação oficial adotada pelas Forças Armadas é Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP), que abrange não apenas a aeronave, mas também as estações de pilotagem remota, enlaces de comando e controle e operadores humanos envolvidos (ICAO, 2011; BRASIL, 2023).

Embora o termo “drone” seja utilizado de forma genérica, a adoção das classificações técnicas, UAV, USV e UUV, proporciona maior precisão e alinhamento com as terminologias de órgãos internacionais.

Este trabalho tem como foco os Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP), com especial atenção às aeronaves que, no contexto internacional, são usualmente denominadas *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV). O interesse recai sobre aquelas plataformas com potencial para integração de sistemas letais autônomos. Essas tecnologias assumem papel cada vez mais relevante no campo militar contemporâneo, tanto pela capacidade de ampliar a consciência situacional em áreas extensas, como a Amazônia Azul, quanto pela possibilidade de incorporar funções autônomas em operações de vigilância, dissuasão e combate.

Nas seções seguintes, o foco será aprofundado nos aspectos técnicos, operacionais e estratégicos do uso dos SARP armados no contexto da MB.

1.1.2 SARP – Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas

A adoção do termo Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP) no Brasil não corresponde apenas a uma tradução literal do conceito internacional de RPAS, empregado pela ICAO. Trata-se de uma escolha doutrinária que busca alinhar a terminologia nacional aos regulamentos do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), assegurando coerência normativa e operacional com as FA brasileiras (ANAC, 2023).

Essa padronização possui implicações práticas relevantes. Ao contrário do uso genérico da palavra drone, associado a aplicações recreativas ou comerciais, o termo SARP reforça a distinção entre plataformas profissionais e militares, enquadrando-as em um arcabouço regulatório mais robusto e aderente às necessidades da defesa nacional.

No plano internacional, a ICAO estabelece o RPAS como referência normativa global (ICAO, 2015). Já no âmbito da MB, a classificação dos SARP, em consonância com as diretrizes do Ministério da Defesa, prioriza o tipo de emprego do sistema, tático, operacional ou estratégico, em complemento aos critérios de peso ou alcance, mais usuais em regulamentações civis e na indústria aeroespacial⁵.

⁵ A Estratégia Nacional de Defesa (END) estabelece que a Defesa se organiza em três níveis de emprego: estratégico, operacional e tático (BRASIL, 2025, Anexo II). Essa mesma lógica pode ser aplicada à análise de sistemas não tripulados, como os SARP, permitindo compreendê-los em uma perspectiva compatível com a doutrina nacional.

A Portaria nº 213/DGMM/2022 organiza os SARP em categorias de acordo com o Peso Máximo de Decolagem (PMD), permitindo maior precisão no enquadramento normativo e no controle de suas aplicações militares (BRASIL, 2022). No Quadro 1 os SARP são organizados em categorias conforme o Peso Máximo de Decolagem (PMD):

Quadro 1 - Classificação de SARP por categoria

Categoria	Peso Máximo de Decolagem (PMD)
Categoria 0	Até 2 kg
Categoria 1	Acima de 2 kg e até 25 kg
Categoria 2	Acima de 25 kg e até 150 kg
Categoria 3	Acima de 150 kg

Fonte: Portaria nº 213/DGMM/2022

Essa categorização reflete diferenças operacionais importantes. As aeronaves pertencentes às categorias 0 e 1 apresentam requisitos de operação mais flexíveis, especialmente sob determinadas condições de segurança e controle de tráfego aéreo. Por outro lado, os sistemas das categorias 2 e 3 exigem padrões operacionais mais rigorosos, considerando fatores como massa, velocidade, deslocamento e a categoria da esteira de turbulência (BRASIL, 2023)⁶.

Essas diferenças impactam diretamente:

- A capacitação de pessoal para operar e manter os sistemas;
- As exigências relacionadas à Segurança de Aviação;
- E os requisitos técnicos afetos às atividades de aquisição, operação e suporte logístico.

Adicionalmente, para permitir maior interoperabilidade e comparação internacional, a MB correlaciona suas categorias com classificações adotadas por outras organizações de defesa e aviação civil. A classificação adotada pela MB para os SARP apresenta correlação com categorias internacionais, como aquelas estabelecidas pela ICAO (ICAO, 2015). Essa

⁶ A metodologia de definição de classes por peso do drone está em processo de transição em favor de uma abordagem alinhada com práticas internacionais de aviação não tripulada, centrada no risco operacional e no desempenho. A ICA 100-40 já não traz classes por peso, e o novo RBAC 100 propõe que a categorização de operações com aeronaves remotamente pilotadas seja orientada por risco e requisitos operacionais. Até que o RBAC 100 seja formalmente aprovado e entre em vigor, coexistem as normas antigas (RBAC-E 94) e a ICA 100-40.

compatibilidade facilita a interoperabilidade entre plataformas nacionais e estrangeiras, além de contribuir para a adaptação de doutrinas operacionais e requisitos de certificação.

Apesar das especificidades do ambiente estratégico brasileiro, a adoção de parâmetros alinhados aos padrões internacionais reforça a integração normativa e técnica das operações de SARP no contexto global.

No que diz respeito aos tipos de operação, os SARP podem ser classificados como:

- Operação em linha de visada visual direta (VLOS);
- Operação em linha de visada visual estendida (EVLOS);
- Ou operação além da linha de visada visual (BVLOS)⁷, conforme regulamentação da ICA 100-40 (BRASIL, 2023).

No contexto militar, os SARP são empregados em missões de inteligência, vigilância, reconhecimento (*Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* - ISR), apoio aéreo aproximado, patrulhamento marítimo e ataque de precisão (UNITED STATES, 2011). Há crescente interesse pela sua integração a sistemas de comando e controle (C2) e pelo emprego de capacidades autônomas letais (BRASIL, 2025).

O domínio conceitual e técnico sobre os SARP é essencial para avaliar as possibilidades e limitações do emprego de tecnologias letais autônomas embarcadas, além de seus impactos regulatórios, operacionais e estratégicos.

No campo civil, as operações de SARP são regulamentadas pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), por meio do RBAC-E nº 94 (ANAC, 2023). Esse regulamento define requisitos gerais para aeronaves não tripuladas e adota as mesmas categorias operacionais já mencionadas, VLOS, EVLOS e BVLOS, aplicadas especificamente ao contexto da aviação civil⁸.

Apesar dos avanços tecnológicos, as operações de SARP em espaço aéreo brasileiro ainda enfrentam restrições severas, especialmente para missões BVLOS, que requerem autorização específica e a implementação de medidas adicionais de segurança operacional. Essas limitações impactam diretamente a viabilidade de emprego de SARP armados e autônomos no patrulhamento persistente de áreas estratégicas como a Amazônia Azul.

⁷ VLOS (*Visual Line of Sight*) refere-se à operação com linha de visada visual direta; EVLOS (*Extended Visual Line of Sight*) indica a extensão dessa visada mediante apoio de observadores; e BVLOS (*Beyond Visual Line of Sight*) corresponde à operação além do alcance visual direto do operador.

⁸ Tanto a ICA 100-40, publicada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), quanto o RBAC-E nº 94, da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), utilizam a classificação VLOS, EVLOS e BVLOS. A diferença reside no âmbito de aplicação: a ICA 100-40 regula o acesso ao espaço aéreo brasileiro em termos gerais, enquanto o RBAC-E nº 94 disciplina especificamente as operações civis.

1.1.3 Armas Autônomas Letais

As Armas Autônomas Letais (SAAL), conhecidas internacionalmente como LAWS, representam uma categoria emergente de sistemas capazes de empregar força letal sem a necessidade de intervenção humana contínua após a ativação. A ascensão desse conceito nas discussões internacionais reflete o impacto que tais tecnologias têm exercido não apenas sobre o campo de batalha, mas também sobre as normas jurídicas e os regimes de governança da guerra.

As primeiras referências sistemáticas às SAAL surgiram na década de 2010, impulsionadas pela preocupação com o desenvolvimento de plataformas dotadas de inteligência artificial suficiente para tomar decisões de vida e morte de maneira independente (FUNAG, 2020; Human Rights Nations, 2018).

Até o presente momento, não há consenso internacional sobre uma definição universalmente aceita para os sistemas de armas autônomas letais. As posições variam entre Estados e organizações, refletindo diferentes tradições jurídicas, interesses estratégicos e capacidades tecnológicas. O Quadro 2 sistematiza exemplos de definições e declarações oficiais, tal como registradas em relatórios do Grupo de Peritos Governamentais (*Group of Governmental Experts* - GGE) da CCW e em documentos de pesquisa reconhecidos.

Quadro 2 - Exemplos de definições de SAAL segundo países e organização

País ou instituição	Definição, conceito de LAWS	Referência
Estados Unidos	Sistemas de armas que, uma vez ativados, podem selecionar e atingir alvos sem intervenção adicional de um operador humano.	DoD Directive 3000.09. (UNITED STATES, 2012, atualizada em 2017)
França	Sistemas plenamente autônomos, capazes de definir ou alterar a missão sem validação humana e empregar força letal sem supervisão humana.	Comité d'Éthique de la Défense (2021)
Alemanha	Sistemas que excluem completamente o fator humano das decisões sobre uso da força, destacando a necessidade de controle humano suficiente.	German Commentary on Guiding Principles (2020)
China	Sistemas com capacidades autônomas letais; considera inaceitáveis aqueles sem intervenção humana em todo o ciclo, imprevisíveis e com evolução autônoma.	China Working Paper (2022)
Reino Unido	Sistemas capazes de interpretar diretivas de alto nível e agir de forma independente, mas governo defende o “envolvimento humano apropriado ao contexto”.	UK Defence AI Strategy (2022)
CICV	Armas autônomas selecionam e aplicam força sem intervenção humana após ativação; atuam com base em sensores e perfis generalizados.	CICV (2021) - ICRC Position

Fonte: Elaboração própria a partir das referências constantes no quadro

Essas divergências refletem não apenas diferentes perspectivas éticas, mas também interesses estratégicos e capacidades tecnológicas distintas. A literatura especializada identifica como características comuns às SAAL a capacidade de percepção autônoma do ambiente, a análise de informações sensoriais, a decisão sobre o engajamento e a execução da ação letal sem intervenção humana no ciclo decisório imediato (UNITED STATES, 2012; UNIDIR, 2021).

O avanço das tecnologias que possibilitam esses sistemas envolve a integração de sensores multiespectrais, técnicas de fusão de dados, inteligência artificial embarcada e arquiteturas de comando e controle distribuído. Esses elementos são projetados para permitir a operação em ambientes dinâmicos, sujeitos a negação de comunicações e sob a necessidade de resposta rápida a mudanças no cenário operacional (Khurana, 2018; UNIDIR, 2021).

No plano estratégico, a utilização de SAAL oferece vantagens evidentes, como a redução da exposição de tropas em operações de alto risco, a possibilidade de operar de forma persistente em ambientes hostis e a ampliação da velocidade de reação tática. Por outro lado, surgem preocupações crescentes sobre a confiabilidade dos sistemas em ambientes complexos e imprevisíveis, o risco de escalada não intencional de conflitos, a dificuldade de atribuição de responsabilidade jurídica em caso de falhas e a potencial violação de princípios do Direito Internacional Humanitário, como distinção, proporcionalidade e responsabilidade (Human Rights Nations, 2018).

O debate contemporâneo revela que as implicações dos sistemas letais autônomos ultrapassam a mera dimensão técnica. Trata-se de uma transformação de natureza estratégica, capaz de alterar padrões de uso da força, balanças regionais de poder e regimes internacionais de controle de armamentos. Nesse sentido, o estudo das SAAL não pode se limitar à engenharia dos sistemas, exigindo uma análise crítica sobre as possibilidades e os limites de sua integração às doutrinas militares nacionais.

Neste relatório técnico, a análise concentrar-se-á na avaliação da viabilidade estratégica de integração de tecnologias autônomas letais em plataformas aéreas não tripuladas, em especial nos SARP, no contexto das necessidades da MB. As dimensões jurídicas e ético-normativas, embora reconhecidas como essenciais, serão abordadas de maneira complementar, tendo em vista o escopo delimitado deste estudo.

1.1.4 Automação vs. Autonomia

A distinção entre automação e autonomia é fundamental para a compreensão do desenvolvimento de sistemas de armas modernos e para a correta análise do impacto estratégico da integração de tecnologias inteligentes em plataformas militares. Embora, por vezes, os termos sejam empregados de maneira intercambiável no discurso cotidiano, suas diferenças conceituais são significativas e implicam consequências diretas para a estruturação de doutrinas, regras de engajamento e arcabouços jurídicos.

A automação refere-se à capacidade de um sistema executar tarefas específicas a partir de instruções pré-programadas, seguindo sequências determinadas de comandos que respondem a entradas previsíveis do ambiente. Nesse tipo de sistema, o comportamento é altamente previsível e o agente artificial não interpreta ativamente o contexto. Sua reação é desencadeada por gatilhos definidos no projeto.

Como destacam Williams e Scharre (2015), a automação manifesta-se pela programação prévia que permite a execução de funções sem intervenção humana direta, característica presente em exemplos clássicos como mísseis de cruzeiro que seguem rotas pré-estabelecidas por GPS ou sistemas de defesa antiaérea que disparam automaticamente contra alvos que cruzam parâmetros programados.

Por outro lado, a autonomia implica uma capacidade qualitativamente distinta: a de perceber o ambiente, interpretar variáveis dinâmicas, ponderar alternativas e selecionar cursos de ação com base em objetivos estabelecidos previamente, mas sem comandos específicos para cada situação. Sistemas autônomos não apenas reagem, mas tomam decisões adaptativas, ajustando seu comportamento em resposta a mudanças no ambiente operacional. Nesse sentido, Falcone e Castelfranchi (2000) argumentam que a autonomia decorre de diferentes níveis de delegação, permitindo que o agente mantenha um modelo interno de objetivos e estados que fundamenta sua capacidade decisória.

Essa distinção conceitual ganha particular relevância no contexto militar, onde os sistemas operam frequentemente sob condições de imprevisibilidade, com exigências de adaptação rápida a ameaças emergentes. Sistemas automatizados são confiáveis para tarefas padronizadas, mas tendem a falhar quando confrontados com situações que escapam dos parâmetros previstos. Já sistemas autônomos, ao integrar percepção ambiental e capacidade decisória, apresentam maior flexibilidade, mas também novos riscos, como comportamento inesperado ou decisões inadequadas em situações extremas.

A diferenciação entre automação e autonomia não se restringe à engenharia de sistemas: ela influencia diretamente a forma como as FA estruturam a supervisão humana, distribuem responsabilidade sobre o uso da força e desenham suas estratégias operacionais. No caso das SAAL, o grau de autonomia embarcada determina não apenas a performance em combate, mas também as implicações jurídicas e éticas de sua utilização.

É importante ressaltar que a autonomia não constitui um atributo absoluto, nem se manifesta de forma dicotômica. Ela se expressa em diferentes níveis, que variam conforme as funções atribuídas ao sistema, como aquisição de dados, análise da situação, tomada de decisão e execução de ações. Um sistema pode apresentar elevado grau de autonomia em determinadas funções e, simultaneamente, permanecer automatizado ou dependente de comando humano em outras. Essa característica reforça a necessidade de abordagens analíticas multifatoriais para a classificação e a avaliação da autonomia em sistemas complexos.

A autonomia em sistemas de armas letais não deve ser compreendida como uma capacidade monolítica, mas sim como um conjunto de funções organizadas em camadas de complexidade crescente, que vão desde a mobilidade básica até a decisão de uso letal da força.

Cada camada representa uma tarefa operacional que pode ser realizada com maior ou menor grau de independência humana, e cuja automação progressiva amplia o papel do sistema frente à supervisão ou comando direto. A Figura 1, descreve as principais camadas funcionais que, em conjunto, compõem a autonomia operacional de uma plataforma aérea armada.

Figura 1 - Camadas funcionais de autonomia em sistemas aéreos armados



Fonte: Elaborado pelo autor com base em NIST (2004), Scharre (2018) e UNITED STATES (2019)

Abaixo, são descritas as dez camadas funcionais progressivas, que ilustram os graus de autonomia possíveis para essas plataformas, alinhadas a requisitos operacionais e tecnológicos específicos:

1-Decolagem autônoma: controle automatizado de propulsão e estabilização da aeronave durante o início da missão, sem intervenção humana direta.

2-Desvio de obstáculos: detecção e desvio autônomo de obstáculos em tempo real usando sensores como LIDAR⁹, câmeras estereoscópicas e radar de proximidade.

3-Navegação e planejamento de rota: geração, seguimento e replanejamento de rotas com base em dados geoespaciais, GNSS (*Global Navigation Satellite System*), sensores inerciais e missão tática.

4-Mapeamento e localização: construção de mapas em tempo real e auto-localização do sistema em ambientes sem GPS, urbanos ou com interferência eletromagnética.

5-Comunicação tática autônoma: Manutenção de enlaces de comando, controle, comunicações, computação, inteligência, vigilância e reconhecimento (C4ISR - *Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*),

⁹ LIDAR (*Light Detection and Ranging*): sensor que emite pulsos de laser para mapear objetos com alta precisão espacial.

retransmissão e coordenação de dados com estações de comando e outras plataformas sem supervisão constante.

6-Busca e aquisição de alvos: varredura de área, detecção de padrões e reconhecimento de alvos com base em sensores.

7-Aproximação e rastreamento do alvo: acompanhamento dinâmico do alvo, cálculo de rota de interceptação, ajustes de velocidade e trajetória em tempo real.

8-Comportamento em enxame (*swarming*): coordenação descentralizada entre múltiplos sistemas para dividir tarefas, cobrir área ampliada ou operar em formação inteligente.

9-Tomada de decisão para o engajamento: avaliação autônoma de critérios legais, táticos e operacionais para decidir sobre o uso da força com base em regras embutidas e IA embarcada.

10-Execução do disparo (engajamento letal): realização do disparo com ou sem verificação humana final, integrando sensores, armas e lógica embarcada.

O Quadro 3 apresenta um comparativo entre os conceitos de automação e autonomia em sistemas militares, com base em critérios como tomada de decisão, supervisão humana, flexibilidade operacional e capacidade de aprendizado. O quadro evidencia que, enquanto a automação executa tarefas pré-programadas sob supervisão constante, a autonomia implica capacidade adaptativa e independência crescente na condução de funções complexas. Essa distinção é fundamental para compreender os limites e potencialidades dos sistemas autônomos letais.

Quadro 3 - Comparativo entre Automação e Autonomia em Sistemas Militares

Critério	Automação	Autonomia
Decisão	Baseada em regras fixas ou programação prévia	Tomada com base em percepção e processamento dinâmico do ambiente
Flexibilidade	Limitada a cenários previsíveis	Capacidade de adaptação a situações não antecipadas
Supervisão Humana	Requer supervisão constante ou frequente	Pode operar com supervisão intermitente ou sem supervisão
Capacidade de Aprendizado	Inexistente ou mínima	Pode incorporar algoritmos de aprendizado de máquina (Machine Learning)
Exemplo Típico	Piloto automático comercial, sistema de defesa de ponto automatizado com programação fixa.	Drone com identificação, rastreamento e engajamento autônomos

Fonte: Elaborado com base em Scharre (2018) e Parasuraman *et al.* (2000)

No presente trabalho, essa diferenciação entre automação e autonomia será central para a análise da integração de capacidades autônomas letais em SARP, reconhecendo que a simples adição de funções automáticas não caracteriza, por si só, uma verdadeira capacidade autônoma.

A compreensão desses conceitos permitirá avaliar com maior precisão as possibilidades, os limites e os riscos estratégicos associados ao emprego de tecnologias emergentes no ambiente marítimo brasileiro.

1.1.5 Níveis de Autonomia

A autonomia em sistemas militares, particularmente em SAAL, deve ser compreendida como um conceito multifacetado, que abrange diversas dimensões de funcionamento e interação com o ambiente operacional. Não se trata de uma condição binária, autônomo ou não autônomo, mas de um espectro contínuo de capacidades que variam em complexidade, adaptabilidade e grau de intervenção humana exigida.

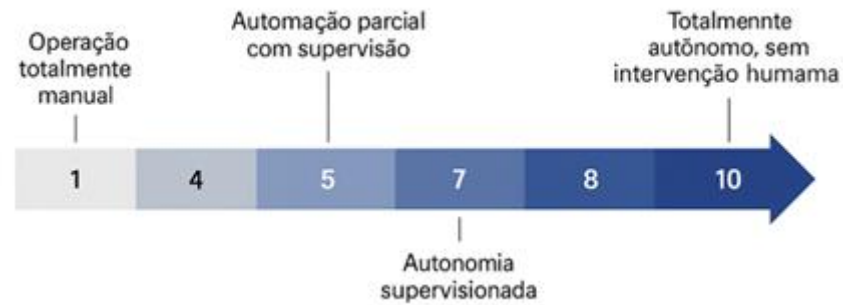
Inicialmente, é possível identificar a chamada autonomia funcional, conceito que descreve a autonomia atribuída a cada etapa do processo operacional. Assim, um sistema pode apresentar diferentes graus de autonomia nas funções de aquisição de dados, análise da situação, tomada de decisão e execução de ações. Um SARP, por exemplo, pode ser programado para identificar alvos autonomamente, mas ainda depender de autorização humana para o disparo, revelando um nível de autonomia parcial.

Outro aspecto relevante é a autonomia interacional, que descreve a relação entre o sistema autônomo e o operador humano. Essa relação é tradicionalmente classificada em três modalidades. No modelo "homem-no-loop", a intervenção humana é necessária para autorizar cada ação crítica, garantindo o controle direto sobre o uso da força. No modelo "homem-sobre-o-loop", o sistema realiza a ação autonomamente, mas sob supervisão humana, que pode intervir para corrigir ou interromper sua atuação. Por fim, no modelo "homem-fora-do-loop", o sistema é projetado para operar sem intervenção humana em tempo real, o que representa o estágio mais avançado e controverso de autonomia, particularmente no campo dos SAAL.

A análise dos níveis de autonomia também pode considerar classificações baseadas na complexidade da missão e na capacidade de interação com o ambiente. A Escala Linear Categórica originalmente proposta por Clough (2002), conforme citada em Williams; Scharre

(2015)¹⁰, estabelece uma gradação de autonomia de 0 a 10, indo do controle humano total à plena autonomia decisória (Figura 2).

Figura 2 - Escala de autonomia operacional em sistemas militares



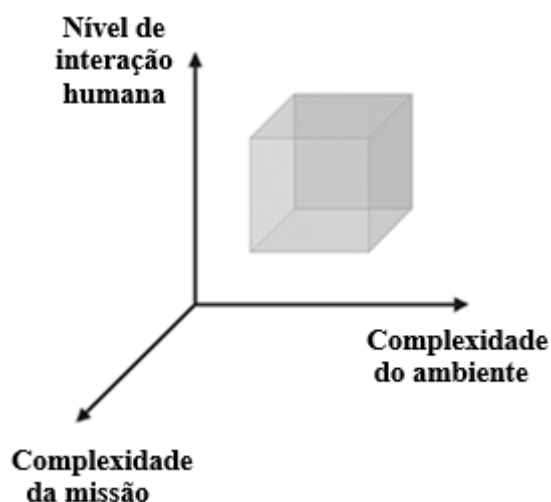
Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de Williams; Scharre (2015)

A abordagem ALFUS (*Autonomy Levels for Unmanned Systems*) do NIST (2007) propõe uma avaliação multidimensional baseada na interação ambiental, na complexidade da missão e na dependência de supervisão humana.

A Figura 3 representa uma simplificação do modelo ALFUS, desenvolvido pelo NIST (2007), que propõe uma abordagem tridimensional para classificar o grau de autonomia em sistemas robóticos. Os três eixos principais, complexidade da missão, complexidade do ambiente e nível de interação humana, permitem uma avaliação mais realista das capacidades autônomas, superando classificações unidimensionais. Quanto maior a complexidade da missão e do ambiente, e menor a necessidade de intervenção humana, mais alto é o nível de autonomia funcional do sistema. Esse modelo foi concebido como um modelo de referência comum para governo, indústria e academia (NIST, 2007), reforçando sua adoção em centros de pesquisa e em programas de defesa aplicados à robótica militar.

¹⁰ A formulação da Escala Linear Categórica é atribuída a Bruce T. Clough (2002). Neste relatório, entretanto, a referência é feita de forma indireta, a partir de Williams; Scharre (2015), que consolidam e discutem a proposta original no contexto das políticas de defesa.

Figura 3 - Modelo ALFUS de avaliação da autonomia de sistemas robóticos



Fonte: NIST (2007)

A perspectiva oferecida por Parasuraman *et al.* (2000), introduz ainda o conceito de autonomia graduada por subsistemas, sugerindo que diferentes funções, como sensoriamento, interpretação, decisão e execução, podem ser autônomas em graus distintos dentro de um mesmo sistema. Essa visão reforça a ideia de que a autonomia não é uma propriedade única e uniforme, mas uma composição variável que deve ser analisada caso a caso.

No âmbito estratégico, o grau de autonomia atribuído a um sistema influencia diretamente sua aplicabilidade operacional, sua confiabilidade em cenários complexos e sua conformidade com os princípios do Direito Internacional Humanitário. Sistemas com elevados níveis de autonomia funcional e interacional tendem a ser mais eficazes em ambientes de guerra eletrônica, em zonas de acesso negado ou em missões de longa duração sem suporte logístico contínuo. No entanto, esses mesmos sistemas apresentam riscos ampliados de comportamentos imprevistos, de erros de identificação de alvos e de dificuldade de atribuição de responsabilidade em caso de incidentes.

A consideração dos níveis de autonomia é, portanto, essencial não apenas para a avaliação técnica dos SAAL, mas para a formulação de doutrinas, regras de engajamento e políticas de governança. No presente estudo, a análise dos níveis de autonomia servirá de base para avaliar a viabilidade estratégica da integração de tecnologias autônomas em SARP, reconhecendo que a autonomia não é um fim em si mesmo, mas um instrumento que deve ser calibrado conforme as necessidades operacionais, as capacidades nacionais e as restrições normativas aplicáveis.

1.1.6 Drones Armados Convencionais vs. SARP com Funções Autônomas

A distinção entre drones armados convencionais e SARP com funções autônomas é um elemento central para a compreensão dos desafios estratégicos e operacionais relacionados à incorporação de tecnologias autônomas letais em plataformas aéreas. Embora ambos os sistemas compartilhem características estruturais semelhantes, como o emprego de sensores, sistemas de comunicação e capacidade de emprego de armamento, suas diferenças funcionais refletem transformações profundas no modo como a força letal é empregada no campo de batalha contemporâneo (Scharre, 2018; Boulanin; Verbruggen, 2017).

Drones armados convencionais operam fundamentalmente sob o princípio do controle humano direto (Horowitz, 2016). Todas as funções críticas, desde a identificação do alvo até a decisão de engajamento, dependem da ação de operadores remotos. A aeronave funciona como um vetor que estende a capacidade de percepção e ação do operador, mas não substitui o julgamento humano. A eficácia operacional desses sistemas é condicionada à manutenção de enlaces de comunicação seguros, estáveis e de alta capacidade de transmissão de dados em tempo real. Em ambientes nos quais esses enlaces sejam degradados ou interrompidos, a capacidade operacional do drone é severamente comprometida (UNITED STATES, 2012).

Em contraste, os SARP com funções autônomas incorporam capacidades que lhes permitem executar tarefas complexas de forma independente, reduzindo a dependência da comunicação contínua com o operador. Esses sistemas são dotados de módulos de percepção avançada, algoritmos de fusão de dados, inteligência artificial embarcada e arquiteturas decisórias que permitem a detecção, classificação e priorização de alvos, bem como a execução de missões de engajamento dentro de parâmetros predefinidos, mesmo em condições de perda de comunicação (Boulanin; Verbruggen, 2017).

Essa evolução tecnológica implica mudanças substanciais nas doutrinas de emprego, na arquitetura de comando e controle e nos regimes de responsabilidade operacional. No modelo convencional, o operador humano é o elo crítico para garantir que decisões letais respeitem as regras de engajamento e os princípios do Direito Internacional Humanitário. Já nos SARP autônomos, parte desse processo é delegado ao sistema, o que exige a adoção de novas medidas de verificação de conformidade, segurança algorítmica e confiabilidade dos processos decisórios automáticos (Scharre, 2018).

A seguir, são sintetizadas as principais diferenças entre drones armados convencionais e SARP com funções autônomas:

Quadro 4 - Diferenças entre Drones Armados e SARP com Funções Autônomas

Aspecto	Drones Armados Convencionais	SARP com Funções Autônomas
Tomada de decisão	Comando humano direto em todas as etapas críticas	Processamento autônomo de percepção, classificação e decisão dentro de parâmetros pré-programados
Dependência de comunicação	Alta dependência de enlaces em tempo real	Capacidade de operação em ambientes de comunicação degradada
Responsabilidade sobre o uso da força	Mediata, atribuída ao operador humano remoto	Compartilhada entre projetistas, programadores e operadores conforme as condições de ativação
Aplicabilidade operacional	Ambientes com infraestrutura de comunicação segura e robusta	Ambientes hostis, contestados ou sujeitos à negação de comunicações

Fonte: Elaborado com base em Scharre (2018), Boulanin e Verbruggen (2017), UNITED STATES (2012)

A adoção de SARP com funções autônomas é vista como um caminho para ampliar a resiliência operacional em cenários de alta complexidade, como operações marítimas em áreas de acesso negado ou de guerra eletrônica intensa. No entanto, a introdução de capacidades autônomas em plataformas armadas também eleva os riscos associados à confiabilidade do sistema, à transparência da lógica decisória e à possibilidade de comportamentos inesperados.

Essas mudanças reforçam a necessidade de uma abordagem integrada que considere, simultaneamente, os requisitos tecnológicos, as implicações jurídicas e as orientações estratégicas para o desenvolvimento, a aquisição e o emprego de SARP com funções autônomas (Scharre, 2018; Human Rights Nations, 2018). No contexto deste trabalho, a análise dessas diferenças constitui uma etapa essencial para a avaliação da viabilidade estratégica da adaptação e integração de tecnologias autônomas letais no ambiente marítimo brasileiro.

1.2 Regulamentação e Debates Internacionais

O desenvolvimento de SAAL gerou, desde a década de 2010, intensos debates no cenário internacional, especialmente no âmbito jurídico, estratégico e ético. Diferentemente de outras tecnologias emergentes, cuja regulamentação ocorre em ritmos variados, os SAAL provocaram desde cedo preocupações sobre sua conformidade com o Direito Internacional Humanitário (DIH) e sobre a necessidade de estabelecer novos instrumentos normativos para regular seu desenvolvimento e emprego. A possibilidade de que máquinas pudessem tomar decisões letais sem supervisão humana direta suscitou questionamentos quanto à manutenção dos princípios fundamentais da guerra, como distinção, proporcionalidade e responsabilidade (Human Rights Nations, 2018).

O principal foro multilateral para a discussão internacional sobre SAAL é a Convenção sobre Certas Armas Convencionais da ONU. Estabelecida em 1980, a CCW tem como objetivo restringir ou proibir o uso de armas que causem efeitos indiscriminados ou que sejam consideradas excessivamente nocivas. Desde 2013, a CCW passou a incluir, entre seus Grupos de Especialistas Governamentais, a discussão específica sobre armas autônomas letais. Esses encontros reúnem representantes de Estados-partes, organizações internacionais e sociedade civil, buscando construir entendimentos comuns sobre os riscos, benefícios e possíveis regulamentações aplicáveis a essa categoria de sistemas (ONU, 2019).

Apesar do reconhecimento generalizado da importância de debater a autonomia no uso da força, as posições dos Estados permanecem profundamente divergentes. Países como Estados Unidos, Rússia, China, Israel e Coreia do Sul, que lideram o desenvolvimento de tecnologias autônomas, tendem a resistir à adoção de restrições preventivas, defendendo que os SAAL podem ser empregados de forma consistente com o DIH existente. Argumentam que novas tecnologias, devidamente reguladas por políticas de uso ético e regras de engajamento adequadas, não requerem proibição específica (Boulanin; Verbruggen, 2017; Horowitz, 2016).

Por outro lado, uma coalizão crescente de Estados, liderada por nações como Áustria, Brasil, Chile e México, e apoiada por organizações como o Comitê Internacional da Cruz Vermelha e a campanha *Stop Killer Robots*, defende a necessidade de um instrumento jurídico vinculante que proíba ou regule estritamente o desenvolvimento e o emprego de SAAL. Essa posição enfatiza a importância do controle humano significativo sobre decisões de uso da força, destacando que a ausência desse controle ameaça princípios fundamentais do DIH e dos direitos humanos (Human Rights Nations, 2018; ONU, 2021).

No contexto desses debates, emergiram três principais correntes de opinião:

1. **Proibição total** do desenvolvimento, produção e uso de SAAL, sob o argumento de que sua existência seria incompatível com a dignidade humana e com os princípios do DIH.
2. **Regulamentação baseada em “controle humano significativo”**, segundo a qual decisões críticas sobre o uso da força devem sempre envolver supervisão humana efetiva.
3. **Suficiência do marco jurídico internacional vigente**, defendendo que novas medidas poderiam limitar indevidamente o desenvolvimento tecnológico legítimo e comprometer a segurança internacional (Boulanin; Verbruggen, 2017; Human Rights Nations, 2018).

O Brasil tem desempenhado um papel relevante nas discussões internacionais sobre SAAL, tradicionalmente alinhado à posição favorável à regulamentação. Nos encontros do GGE da CCW, o país tem reiterado a importância de preservar o controle humano sobre o uso da força

e defendido a necessidade de adotar medidas preventivas que evitem o desenvolvimento irrestrito de sistemas letais autônomos.

A diplomacia brasileira tem buscado construir pontes entre os Estados favoráveis à proibição e aqueles mais reticentes, enfatizando a necessidade de uma resposta equilibrada que considere tanto as oportunidades quanto os riscos das novas tecnologias (BRASIL, 2019).

A dificuldade em se alcançar uma definição comum para sistemas de armas autônomos letais no âmbito do GGE da CCW entre 2014 e 2019 foi analisada em profundidade por Taddeo e Blanchard (2022). Em seu estudo comparativo, os autores destacam a diversidade de marcos conceituais apresentados pelos Estados, evidenciando a ausência de convergência quanto aos elementos fundamentais que caracterizariam um SAAL (Quadro 5).

Segundo a análise, embora houvesse um consenso sobre a necessidade de preservar o controle humano significativo no uso da força, os participantes divergiam em relação à autonomia na seleção de alvos, à independência decisória dos sistemas e à extensão aceitável da intervenção humana. Essa multiplicidade de abordagens conceituais foi sistematizada pelos autores em um quadro comparativo que ilustra a complexidade das negociações multilaterais e a dificuldade de estabelecer padrões jurídicos universais sobre o tema.

Quadro 5 - Marcos Conceituais do Debate no âmbito do GGE/CCW (2014–2019)

Ano	Principal Documento / Fonte	Enfoque sobre SAAL
2014	Relatório Preliminar do GGE	Ênfase na necessidade de controle humano significativo; preocupação com a responsabilidade jurídica.
2015	Documento de Discussão	Exploração dos diferentes graus de autonomia; reconhecimento da ausência de definição única.
2016	Relatório do GGE	Inclusão de noções de autonomia baseada em funções críticas, como seleção e engajamento de alvos.
2017	Recomendações do GGE	Introdução do conceito de interação homem-máquina; debate sobre limites aceitáveis de autonomia.
2018	Relatório do Presidente do GGE	Consolidação da noção de controle humano significativo como princípio orientador.
2019	Relatório do GGE	Reconhecimento formal da necessidade de manter a supervisão humana ao longo do ciclo de operação dos sistemas autônomos.

Fonte: Síntese elaborada pelo autor a partir da análise comparativa dos documentos do GGE/CCW realizada por Taddeo e Blanchard (2022)

As dificuldades para se alcançar um consenso internacional sobre a regulamentação dos SAAL decorrem, em grande medida, da combinação entre fatores tecnológicos, jurídicos e estratégicos. A ausência de uma definição operacional unívoca para “autonomia” no contexto

militar cria margens para interpretações divergentes, tanto em relação ao que deve ser regulado quanto em relação ao que seria considerado aceitável dentro do marco jurídico existente.

O estudo do SIPRI em parceria com o Comitê Internacional da Cruz Vermelha destaca que a autonomia em sistemas de armas não pode ser ilimitada, sendo necessário estabelecer medidas de controle humano, tanto sobre parâmetros operacionais, quanto sobre o ambiente de uso e a interação humano-máquina, de modo a assegurar a conformidade dessas tecnologias com os princípios do Direito Internacional Humanitário (Boulainin *et al.*, 2020).

Outro fator relevante é o impacto potencial dos SAAL sobre a dinâmica estratégica global. A capacidade de empregar força letal de maneira mais rápida, dispersa e resiliente, sem a necessidade de comunicações contínuas ou controle humano direto, pode alterar equilíbrios de poder regionais e desafiar as bases tradicionais de dissuasão. Para alguns Estados, os SAAL representam uma oportunidade de vantagem assimétrica; para outros, constituem uma ameaça imprevisível à estabilidade internacional. Essas percepções estratégicas assimétricas dificultam a formação de um consenso quanto ao escopo e à natureza da regulamentação necessária (Human Rights Nations, 2018; Horowitz, 2016).

Dentro desse cenário, propostas alternativas vêm sendo discutidas como caminhos intermediários. Entre elas, destaca-se a defesa da obrigatoriedade do “controle humano significativo” como critério mínimo para o uso legítimo da força. Essa abordagem busca assegurar que a decisão de empregar força letal permaneça, em última instância, sob a responsabilidade de seres humanos, ainda que intermediada por sistemas autônomos. No entanto, mesmo essa formulação, aparentemente conciliatória, enfrenta dificuldades práticas, dada a diversidade de interpretações sobre o que constitui controle suficiente e sobre como operacionalizar esse conceito em diferentes contextos militares (ONU, 2021).

O Brasil, nesse ambiente de negociações complexas, mantém uma postura de equilíbrio. Defende a necessidade de salvaguardar os princípios humanitários fundamentais e a centralidade do controle humano, ao mesmo tempo em que reconhece o potencial uso dual de muitas tecnologias associadas aos sistemas autônomos, como inteligência artificial, fusão de sensores e robótica avançada.

A posição brasileira, portanto, caracteriza-se por uma combinação de cautela regulatória e pragmatismo estratégico, entendido aqui como a busca por preservar margem de manobra política e tecnológica em um campo ainda em consolidação. Na prática, essa postura se expressa na defesa do controle humano significativo e dos princípios do Direito Internacional Humanitário, sem, contudo, endossar proibições abrangentes que possam restringir o

desenvolvimento, a pesquisa e o emprego de tecnologias de uso dual com aplicações civis e militares.

Ao adotar essa abordagem, o Brasil procura evitar tanto a paralisia normativa decorrente de regulações excessivamente restritivas quanto a aceitação acrítica do emprego de sistemas de armas autônomas letais, mantendo flexibilidade estratégica diante de um ambiente internacional marcado por incertezas tecnológicas e assimetrias de poder (BRASIL, 2019b).

A ausência de um instrumento jurídico vinculante específico para os SAAL revela a dificuldade da comunidade internacional em lidar com tecnologias de alto impacto disruptivo. Padrões normativos estão emergindo informalmente por meio de práticas estatais, interpretações legais, acordos de melhores práticas e instrumentos de *soft law*¹¹, sem ainda haver consenso vinculativo (Boulain, 2020).

De forma semelhante, a Human Rights Nations (2018) documenta como posições nacionais e regionais já moldam práticas que podem evoluir para normas internacionais não vinculantes. Essa evolução normativa fragmentada poderá ter consequências relevantes para Estados que, como o Brasil, buscam desenvolver capacidades tecnológicas autônomas compatíveis com o DIH.

Atualizações Recentes (ONU, CICV, UNIDIR – 2023)

Desde 2020, o debate internacional sobre sistemas de armas autônomas letais continuou a evoluir, ainda que sem a adoção de instrumentos jurídicos vinculantes. Em 2023, o Comitê Internacional da Cruz Vermelha reforçou publicamente a necessidade de assegurar o controle humano significativo em todas as decisões relacionadas ao uso da força letal, advertindo que a delegação irrestrita dessas decisões a sistemas autônomos seria incompatível com os princípios fundamentais do DIH (CICV, 2023).

O UNIDIR também publicou estudos apontando os riscos de proliferação tecnológica, a possibilidade de uso de SAAL por atores não estatais e a dificuldade de responsabilização em caso de falhas ou comportamentos não previstos. Os relatórios do UNIDIR ressaltaram que, à medida que os níveis de autonomia aumentam, torna-se mais urgente definir normas claras para garantir a governança internacional dessas tecnologias emergentes (UNIDIR, 2023a; UNIDIR, 2023b).

¹¹ *Soft law* refere-se a instrumentos normativos não vinculantes juridicamente, como recomendações, diretrizes ou códigos de conduta, que influenciam comportamentos estatais e moldam o desenvolvimento de normas internacionais, ainda que não imponham obrigações legais formais.

No âmbito da CCW, o GGE prosseguiu suas deliberações, mas ainda sem consenso sobre a adoção de um novo tratado específico. Apesar das divergências, registrou-se um fortalecimento da posição majoritária favorável à preservação de controle humano significativo como princípio normativo central. O Brasil manteve sua postura ativa em favor de uma regulamentação equilibrada, compatível com a inovação tecnológica, mas firmemente ancorada nos princípios humanitários.

Esses desenvolvimentos recentes demonstram que, embora o cenário normativo permaneça fragmentado, a preocupação internacional com os riscos associados ao emprego de SAAL continua a se intensificar, indicando que a regulamentação, ainda que gradual e informal, tende a evoluir nos próximos anos.

1.3 Revisão da Literatura

A evolução dos debates sobre SAAL e a integração de funções autônomas em plataformas aéreas não tripuladas vem sendo acompanhada por uma literatura acadêmica e institucional que, embora crescente, ainda apresenta lacunas relevantes, sobretudo no que se refere à análise estratégica de seu impacto em ambientes específicos como o marítimo.

A revisão da literatura que se apresenta neste item tem como objetivo mapear as principais contribuições teóricas e empíricas existentes, identificar tendências dominantes de interpretação e evidenciar os espaços ainda não suficientemente explorados, que justificam a necessidade do presente estudo.

Desde o início da década de 2010, observou-se uma intensificação nas publicações dedicadas ao tema dos SAAL, impulsionada tanto pelos avanços tecnológicos em inteligência artificial e robótica quanto pelas preocupações éticas e jurídicas associadas à possível delegação de decisões letais a sistemas autônomos.

Scharre (2018), em obra de referência sobre o assunto, caracteriza a autonomia em sistemas de armas como um continuum de capacidades, enfatizando que a linha divisória entre sistemas automatizados e sistemas autônomos é fluida e depende da arquitetura de decisão implementada. Boulanin e Verbruggen (2017), em estudo conduzido no âmbito do *Stockholm International Peace Research Institute* (SIPRI), reforçam essa abordagem, propondo uma tipologia funcional que classifica sistemas de armas conforme os graus de automação e autonomia em suas funções críticas, detecção, identificação, decisão e engajamento de alvos.

A literatura também se debruçou sobre as dificuldades conceituais que permeiam o debate internacional. Taddeo e Blanchard (2022) realizaram uma análise comparativa das

diversas definições de SAAL propostas no âmbito da CCW, demonstrando que, apesar dos avanços nas discussões, não há consenso sobre os elementos constitutivos da autonomia letal.

As divergências conceituais afetam diretamente a capacidade de construir normas internacionais claras e reforçam a necessidade de pesquisas que abordem o tema com precisão terminológica e consciência estratégica.

Do ponto de vista tecnológico, a literatura reconhece que os avanços em sensores multiespectrais, algoritmos de fusão de dados, aprendizado de máquina e comunicações seguras são elementos fundamentais para viabilizar a operação de plataformas autônomas em ambientes dinâmicos e contestados. Khurana (2018) destaca a importância da percepção situacional e da robustez decisória para que sistemas autônomos operem de forma confiável em missões de longo alcance, especialmente em cenários de conectividade intermitente ou degradada. Essa análise é complementada por estudos sobre a integração de múltiplos UAVs em ambientes C4ISR, com ênfase na fusão de dados e comunicações seguras, e por relatórios da OTAN que identificam sensores avançados e inteligência artificial embarcada como pilares tecnológicos da autonomia militar.

Por outro lado, análises críticas, como as Human Rights Nations (2018), alertam para os riscos associados à dependência de sistemas autônomos para decisões letais. Entre os principais riscos identificados estão a dificuldade de responsabilização jurídica em caso de falhas, a possibilidade de discriminação inadequada de alvos e o desafio de assegurar a conformidade com princípios do Direito Internacional Humanitário, como distinção e proporcionalidade, em ambientes complexos e imprevisíveis.

1.3.1 Marcos teóricos e tendências tecnológicas

O desenvolvimento de SAAL é impulsionado por tendências tecnológicas convergentes que abrangem inteligência artificial, sensoriamento multiespectral, fusão de dados, robótica avançada e comunicações seguras em ambientes contestados. A integração progressiva dessas tecnologias permite a expansão da capacidade decisória dos sistemas aéreos, reduzindo a dependência de operadores humanos e possibilitando a realização de missões em cenários de acesso negado, guerra eletrônica intensa ou operações autônomas de longa duração.

No campo da literatura acadêmica e técnica, a autonomia em sistemas militares é analisada a partir de diferentes marcos teóricos, que buscam classificar, descrever e medir o grau de independência funcional desses sistemas. A compreensão da autonomia como um

espectro, e não como uma condição binária, é um ponto central nas abordagens contemporâneas.

Scharre (2018) propõe que a autonomia deve ser compreendida como um contínuo de capacidades, no qual sistemas variam de simples automatização de tarefas a graus mais elevados de tomada de decisão independente. Essa perspectiva enfatiza que não existe uma linha divisória clara entre sistemas automáticos e sistemas autônomos, mas sim uma progressão de funções delegadas aos sistemas artificiais conforme o avanço tecnológico e a sofisticação da arquitetura decisória.

Boulanin e Verbruggen (2017) reforçam essa abordagem ao proporem uma tipologia funcional, segundo a qual sistemas de armas podem ser classificados conforme o nível de automação e autonomia nas funções críticas de detecção, identificação, decisão e engajamento. Para esses autores, o grau de autonomia não reside apenas na execução de tarefas, mas também na capacidade do sistema de interpretar o ambiente e ajustar suas ações conforme parâmetros contextuais dinâmicos.

Entre os modelos de classificação de níveis de autonomia, destaca-se a Escala Linear Categórica desenvolvida por Clough (ver 1.1.5), partindo do controle humano total até a autonomia plena em todos os aspectos da missão. Essa escala tem sido amplamente referenciada como instrumento inicial para distinguir entre diferentes gerações de sistemas militares não tripulados.

Outro marco importante é o modelo ALFUS (*Autonomy Levels for Unmanned Systems*), proposto pelo NIST (2007), que adota uma abordagem multidimensional para avaliar a autonomia, levando em conta a complexidade da missão, a interação ambiental e a dependência de supervisão humana. Esse modelo destaca que a autonomia deve ser vista como uma variável dependente das condições específicas do ambiente operacional e da missão atribuída.

Parasuraman *et al.* (2000) oferecem um modelo funcional que segmenta a autonomia de sistemas em diferentes etapas: aquisição de dados, análise da situação, tomada de decisão e execução de ações. Cada uma dessas funções pode apresentar graus distintos de autonomia, dependendo do design do sistema e do contexto operacional. Esse modelo é particularmente útil para entender sistemas híbridos, nos quais certas funções são totalmente autônomas enquanto outras permanecem sob controle humano.

Esses marcos teóricos revelam que a autonomia em sistemas militares não é apenas um atributo técnico, mas uma construção complexa que envolve escolhas estratégicas, doutrinárias e éticas. A decisão de atribuir maior ou menor grau de autonomia a um sistema reflete

considerações de eficácia operacional, de conformidade jurídica e de responsabilidade estratégica.

Do ponto de vista tecnológico, a literatura especializada aponta para uma série de tendências que moldam o desenvolvimento de sistemas autônomos aplicados a operações militares. Boulanin e Verbruggen (2017) destacam o aprimoramento dos sensores multiespectrais como um elemento-chave para a autonomia operacional, permitindo que os sistemas realizem a detecção, a identificação e o rastreamento de alvos em ambientes dinâmicos sem depender de intervenção humana contínua. Esses sensores, combinados com algoritmos avançados de fusão de dados, aumentam a percepção situacional dos sistemas e sua capacidade de operar em condições ambientais adversas.

Outro vetor tecnológico é o avanço dos algoritmos de aprendizado de máquina, especialmente no campo do *deep learning*, que permite aos sistemas inferir padrões e tomar decisões baseadas em dados incompletos ou ambíguos. LeCun *et al.* (2015) destacam que redes neurais profundas são capazes de extrair inferências contextuais complexas, o que impulsiona a adaptação autônoma em cenários militares de alta complexidade.

A miniaturização e o aumento da capacidade computacional embarcada constituem outra tendência crítica. Scharre (2018) enfatiza que a redução de tamanho e de consumo energético dos sistemas de processamento permite que plataformas de menor porte, como SARP táticos, incorporem capacidades autônomas avançadas, anteriormente restritas a grandes aeronaves ou veículos terrestres pesados.

O relatório do Congressional Research Service observa que alguns Estados consideram que sistemas autônomos poderiam operar em ambientes com comunicações degradadas ou negadas, ainda que não haja confirmação de emprego letal autônomo sem supervisão humana contínua (CRS, 2025). Da mesma forma, o Comitê Internacional da Cruz Vermelha identifica que o interesse militar por maior autonomia em sistemas não tripulados inclui a necessidade de operar em condições de negação de comunicações, embora sublinhe que sistemas plenamente autônomos com decisão letal sem supervisão humana não estejam em uso nem plenamente regulamentados (CICV, 2016).

Também merece destaque a preocupação com a guerra eletrônica direcionada contra sistemas autônomos. O UNIDIR (2021) identifica que *spoofing*¹² de sinais GPS, ataques de

¹² *Spoofing*: Técnica de ataque em que sinais falsificados são transmitidos para enganar sistemas de navegação ou sensores, induzindo-os a erros de localização ou identificação.

*jamming*¹³ e degradação de sensores são ameaças concretas à confiabilidade operacional de plataformas autônomas em missões críticas, exigindo maior resiliência cibernética e de comunicações (Holland, 2021). Além disso, a autonomia para missões Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) vem ganhando importância, especialmente em cenários marítimos e de defesa de fronteiras: o primer do UNIDIR sobre sistemas marítimos e o relatório da FAA sobre BVLOS reforçam a relevância de operação sem contato visual direto, com decisão embarcada, para vigilância persistente e interdição (Bajon; Grand-Clément, 2022; UNITED STATES, 2022).

Essas tendências tecnológicas convergentes demonstram que a evolução da autonomia militar é inseparável do progresso simultâneo em áreas como sensoriamento inteligente, inferência algorítmica, processamento embarcado e comunicações resilientes. A literatura especializada evidencia que o domínio dessas tecnologias é um pré-requisito para a obtenção de vantagens estratégicas em ambientes operacionais cada vez mais complexos e contestados.

1.3.2 Sensores e percepção do ambiente

A percepção do ambiente é uma das capacidades centrais para a operação autônoma de sistemas armados embarcados em veículos aéreos não tripulados. Relatórios da OTAN e do UNIDIR destacam que o avanço da autonomia em sistemas militares está diretamente associado ao desenvolvimento de sensores avançados, à fusão de dados e à integração com algoritmos de inteligência artificial (NATO, 2020; UNIDIR, 2021).

Os sensores mais comumente empregados em SARP com potencial ofensivo incluem câmeras eletro-ópticas, sensores infravermelhos, radares, sistemas LIDAR, sensores acústicos e módulos GNSS. A combinação desses dispositivos possibilita a operação em diversas condições meteorológicas e luminosas, além de permitir a identificação de padrões de movimento e a classificação de alvos com base em assinaturas térmicas, visuais ou eletromagnéticas (Balestrieri *et al.*, 2021).

Samaras *et al.* (2019) e Fayyad *et al.* (2020) demonstram que a fusão eficiente de dados multissensoriais melhora substancialmente a acurácia na detecção de alvos, reduz a incidência de falsos positivos e eleva a confiabilidade dos sistemas em cenários de alta complexidade, como áreas urbanas ou marítimas com intensa densidade de sinais.

¹³ *Jamming*: Técnica de guerra eletrônica que consiste em emitir sinais de interferência para bloquear, degradar ou interromper comunicações e sistemas de navegação por rádio frequência.

Avanços recentes na miniaturização e na eficiência energética dos sensores têm possibilitado que UAVs de médio porte transportem sistemas de detecção de alta performance com impacto limitado na autonomia de voo. No campo da percepção embarcada, tecnologias de sensoriamento multiespectral e calibração radiométrica têm ampliado a qualidade dos dados obtidos por plataformas aéreas não tripuladas (Zhou *et al.*, 2022). Paralelamente, técnicas de visão computacional e aprendizado de máquina vêm sendo aplicadas para detecção de padrões, rastreamento de alvos e apoio à tomada de decisão em sistemas autônomos.

Docherty (2020), Khan *et al.* (2021) e Sung *et al.* (2022) apontam desafios críticos para a confiabilidade sensorial: (i) interferência eletromagnética em ambientes sob guerra eletrônica; (ii) condições degradadas, como nevoeiro, poeira ou superfícies reflexivas, que afetam sensores ópticos; (iii) vulnerabilidades cibernéticas que comprometem a integridade dos dados sensoriais; e (iv) a dependência de sinais de navegação por satélite, que podem ser alvo de ataques de *spoofing* ou *jamming*.

Fourlas *et al.* (2021) enfatiza a necessidade de assegurar a resiliência operacional dos sensores, sobretudo em missões de longa duração e em áreas remotas, como aquelas envolvidas na vigilância da Amazônia Azul. Nesses contextos, a confiabilidade dos sensores deve ser complementada por mecanismos de autodiagnóstico e protocolos de contingência, permitindo que o sistema reconfigure seu comportamento de forma adaptativa diante de falhas ou degradações.

A NATO (2020) reconhece que os sensores são elementos estruturantes para o desempenho autônomo de SARP armados, tanto na percepção situacional quanto na execução de decisões críticas. O contínuo desenvolvimento nessa área é considerado essencial para a viabilidade operacional dos SAAL e vem sendo alvo de intensa pesquisa nos principais centros de excelência em defesa, por meio de colaborações entre universidades, institutos tecnológicos e a indústria de tecnologia militar.

Os sensores constituem o primeiro elo do processo de autonomia, mas é a integração de suas informações que efetivamente gera a percepção do ambiente. Esse conceito vai além da coleta de dados isolados: envolve a construção de uma representação dinâmica e contextualizada do espaço operacional, capaz de orientar decisões em tempo real mesmo sob condições adversas. Assim, a percepção ambiental derivada da fusão multissensorial não apenas amplia a precisão e a confiabilidade dos SARP, como também marca a transição entre sistemas meramente automatizados e sistemas efetivamente autônomos, tornando-se um dos pilares para o desenvolvimento de SAAL em cenários complexos como o marítimo.

1.3.3 Inteligência Artificial Embarcada

A inteligência artificial tem evoluído de forma contínua desde meados do século XX, com marcos que definem diferentes gerações tecnológicas, conforme propõem Wu, You e Du (2025). A primeira geração (IA 1.0) foi centrada no processamento de dados estruturados e reconhecimento de padrões estáticos. A segunda geração (IA 2.0) introduziu sistemas capazes de aprender com o ambiente por meio de técnicas como o aprendizado por reforço, abrindo caminho para aplicações em robótica e veículos autônomos. A terceira geração (IA 3.0), na qual se situam os sistemas de armas autônomas letais, representa a convergência entre agentes inteligentes e meios físicos, caracterizando-se por sistemas capazes de operar de maneira autônoma no mundo real, como aeronaves, veículos terrestres e embarcações. A quarta geração (IA 4.0), ainda em estágio especulativo, refere-se à possibilidade de consciência artificial e autonomia plena.

No contexto militar, especialmente em sistemas embarcados, a IA da terceira geração se destaca por sua capacidade de tomar decisões em tempo real, adaptar-se a cenários dinâmicos e operar de forma distribuída, mesmo em ambientes hostis e com comunicação degradada. É nesse estágio que se encontra a inteligência artificial embarcada em SARP, cuja função não se limita a processar comandos, mas inclui a percepção autônoma do ambiente, a análise de situações táticas, a escolha de alvos e a execução de ações letais com base em objetivos previamente definidos.

A inteligência artificial embarcada constitui o núcleo das capacidades decisórias dos sistemas de armas autônomas letais, sendo responsável por interpretar dados sensoriais, realizar classificações, tomar decisões táticas e executar comandos. Trata-se do componente que viabiliza a autonomia em sua expressão mais crítica, a capacidade de agir de forma independente diante de condições operacionais dinâmicas.

Segundo Boulanin e Verbruggen (2017), a evolução da autonomia em sistemas de armas está relacionada ao aumento do papel de algoritmos avançados em funções críticas como detecção, identificação e engajamento de alvos. Já Khurana (2018) destaca que, no caso dos sistemas aéreos não tripulados, os avanços mais significativos decorrem da aplicação de técnicas de aprendizado de máquina, redes neurais profundas e aprendizado por reforço, que

permitem operar em cenários complexos e ambientes imprevisíveis¹⁴, muitas vezes sem supervisão humana direta.

Trabalhos de referência, como os de Russell e Norvig (2021) e Goodfellow *et al.* (2016), fornecem os fundamentos teóricos da IA moderna, enquanto estudos aplicados, como os de Galliot (2015) e Cummings (2017), exploram os limites de confiabilidade, interpretabilidade¹⁵ e explicabilidade de sistemas autônomos no contexto militar. Tais abordagens destacam os desafios de validar decisões letais tomadas por algoritmos em ambientes caracterizados por incerteza, volatilidade e ambiguidade.

As aplicações militares da IA em plataformas aéreas incluem: reconhecimento automático de alvos (*Automatic Target Recognition* – ATR), planejamento adaptativo de rotas, evasão de ameaças, priorização de alvos e apoio à decisão em tempo real. Em contextos operacionais, redes neurais convolucionais¹⁶ (CNNs) são utilizadas para detecção de objetos, redes recorrentes (RNNs) para previsão de movimentos, e arquiteturas híbridas para operar sob condições de observabilidade¹⁷ parcial (Horowitz, 2016).

Além disso, técnicas de aprendizado por reforço profundo (*Deep Reinforcement Learning*¹⁸) têm sido empregadas para treinar agentes que se adaptam a ambientes complexos sem necessidade de supervisão constante. Essas soluções são especialmente relevantes para cenários onde os parâmetros da missão podem variar em tempo real, exigindo resposta rápida e adaptativa por parte do sistema (Boulanin; Verbruggen, 2017).

Autores como Roff (2014), Horowitz (2016) e Sharkey (2020) chamam atenção para os riscos associados ao fenômeno da “caixa-preta algorítmica”, no qual sistemas baseados em redes profundas apresentam alta acurácia, mas baixa explicabilidade. Essa opacidade é particularmente preocupante em operações militares, onde a responsabilização por ações letais requer transparência nos processos de tomada de decisão.

Também é necessário assegurar que os algoritmos sejam resistentes a tentativas de manipulação ou interferência maliciosa, situações em que pequenas alterações nas entradas sensoriais podem induzir erros críticos. Isso levanta preocupações quanto à segurança

¹⁴ Ambientes imprevisíveis: cenários onde variáveis dinâmicas e incertezas tornam difícil a aplicação de regras fixas ou programações pré-determinadas.

¹⁵ Interpretabilidade: capacidade de um sistema de inteligência artificial de tornar compreensíveis aos seres humanos os processos que levaram a determinada decisão.

¹⁶ Redes neurais convolucionais (CNNs): tipo de rede neural especializada no processamento de dados com estrutura de grade, como imagens, por meio da identificação de padrões locais.

¹⁷ Observabilidade parcial: condição em que o sistema não possui informações completas sobre o ambiente, sendo necessário inferir estados ocultos para tomar decisões.

¹⁸ *Deep Reinforcement Learning*: combinação de redes neurais profundas com técnicas de aprendizado por reforço, permitindo que agentes aprendam políticas de ação em ambientes complexos sem supervisão direta.

cibernética dos modelos embarcados e à necessidade de validação contínua, tanto em ambientes simulados quanto reais (Goodfellow *et al.*, 2016).

Outro desafio diz respeito ao equilíbrio entre complexidade algorítmica e viabilidade computacional embarcada. Em plataformas de médio porte, como os SARP de interesse da MB, há restrições de energia, espaço físico e capacidade de processamento, o que limita a implementação de arquiteturas sofisticadas. Nesses casos, torna-se necessário o uso de modelos otimizados, como redes podadas ou quantizadas¹⁹, bem como o emprego de circuitos integrados específicos (*Application-Specific Integrated Circuits* – ASICs) ou FPGAs configurados para aplicações embarcadas.

Estudo como o de Horowitz (2016) sugere a utilização de IA distribuída, com parte do processamento realizada a bordo e outra parte em servidores externos ou satélites, sempre que o enlace de comunicação o permitir. No entanto, essa abordagem é limitada em cenários de guerra eletrônica ou em regiões com conectividade degradada, como zonas marítimas remotas.

O conceito de *ethical-by-design* tem ganhado espaço como uma abordagem que busca integrar, desde o início do desenvolvimento, considerações normativas, de segurança e de responsabilidade (Cummings, 2017; Sharkey, 2020). Embora o presente trabalho não se aprofunde nas dimensões éticas, a literatura reconhece que o desenvolvimento técnico da IA embarcada não pode ser dissociado desses aspectos, sobretudo no caso de sistemas letais.

No contexto nacional, a produção acadêmica relacionada à aplicação de inteligência artificial embarcada em plataformas letais tem sido abordada de forma indireta ou fragmentada, frequentemente associada a campos como robótica, sistemas inteligentes, defesa cibernética e tecnologias de uso dual. Documentos estratégicos recentes ressaltam que o fortalecimento da Base Industrial de Defesa, em articulação com universidades e centros de pesquisa com atuação nas áreas aeroespacial, de defesa e de sistemas complexos, constitui um vetor relevante para o desenvolvimento gradual de capacidades autônomas no Brasil (EMA-415, 2024).

Grande parte dos avanços recentes em IA, especialmente no campo militar, depende da qualidade dos dados utilizados para o treinamento dos algoritmos. Dois conceitos centrais nesse processo são os dados rotulados e não rotulados. Dados rotulados são aqueles previamente classificados por humanos, por exemplo, imagens de veículos ou embarcações com a indicação explícita do que representam, permitindo que o sistema aprenda com exemplos claros. Já os dados não rotulados não possuem essa categorização explícita e exigem métodos mais

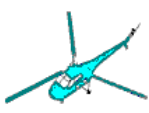
¹⁹ Redes podadas ou quantizadas: técnicas de compressão de modelos neurais que reduzem o número de parâmetros e operações, adaptando-os para execução eficiente em dispositivos com restrições computacionais.

avançados de aprendizado, como o aprendizado não supervisionado, para que padrões sejam descobertos de forma autônoma (Goodfellow *et al.*, 2016).

A distinção entre esses dois tipos de dados é essencial para compreender como os modelos de IA embarcada aprendem a identificar, priorizar e engajar alvos em cenários operacionais. Nos sistemas SARP com funções letais, essa capacidade de processamento e classificação precisa ser altamente confiável, pois atua diretamente sobre a tomada de decisão tática.

A seguir, a Figura 4 ilustra um exemplo de dados rotulados e não rotulados, essenciais para treinar modelos de IA que são aplicados na identificação e classificação de alvos em sistemas como os SARP. Conforme demonstrado por Scharre (2018), essa capacidade é uma das chaves para a atuação em ambientes de combate dinâmicos e de múltiplas ameaças.

Figura 4 - Dados de treinamento rotulados e não rotulados

Dados Rotulados			Dados não Rotulados		
					
Helicóptero	Avião	Helicóptero	Imagem1	Imagem2	Imagem3
					
Avião	Helicóptero	Avião	Imagem4	Imagem5	Imagem6

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Scharre (2018)

Dessa forma, a IA embarcada se consolida como o componente crítico para o funcionamento de sistemas de armas autônomas, sendo objeto de intensa pesquisa multidisciplinar e elemento central na construção da soberania tecnológica em defesa.

1.3.4 Arquiteturas e desafios operacionais

A integração de tecnologias autônomas letais em veículos aéreos não tripulados armados exige mais do que o desenvolvimento de sensores e algoritmos: requer a concepção de arquiteturas sistêmicas capazes de garantir desempenho confiável em cenários operacionais complexos e imprevisíveis. Relatórios como o do SIPRI (Boulanin; Verbruggen, 2017) e estudos do UNIDIR (2021) destacam desafios significativos relacionados à organização dos sistemas embarcados, à resiliência das comunicações, à segurança funcional e à gerência energética.

As arquiteturas típicas de plataformas autônomas integram múltiplos subsistemas, como controle de voo, navegação autônoma, fusão sensorial, processamento algorítmico, enlaces de dados (C2), carga útil (sensores e armamentos) e redundâncias de segurança. A complexidade dessas estruturas aumenta exponencialmente com o grau de autonomia embarcada, exigindo compatibilidade entre componentes heterogêneos e a adoção de interfaces padronizadas e modulares. Nesse sentido, trabalhos como Bekkouche *et al.* (2022), sobre arquiteturas orientadas a serviços para UAVs, e iniciativas normativas como a SAE AS-4 UCS apontam para a importância da modularidade e da interoperabilidade como princípios estruturantes.

Um dos conceitos mais relevantes é o de arquitetura aberta, que possibilita atualizações rápidas de software e hardware, maior interoperabilidade e flexibilidade para integração de novas tecnologias. Esse modelo tem sido amplamente adotado em projetos de veículos aéreos e navais, como forma de garantir adaptabilidade frente ao rápido avanço tecnológico e à necessidade de customização conforme cenários operacionais específicos (Cummins, 2017; Scharre, 2018).

A gestão de energia constitui outro desafio crítico. O funcionamento prolongado de sistemas autônomos depende de fontes energéticas de alta densidade, algoritmos embarcados de controle energético adaptativo e, quando viável, capacidade de reabastecimento em voo ou recarga por energia solar. Trabalhos como o de Oettershagen *et al.* (2016) sobre UAVs solares e relatórios como UNIDIR (2023) destacam a relevância da eficiência energética em missões de longa duração. Isso é particularmente relevante em missões de patrulhamento marítimo em áreas como a Amazônia Azul, onde os SARP devem operar por longos períodos com pouca ou nenhuma infraestrutura de apoio.

A resiliência das comunicações é igualmente determinante para a confiabilidade da missão. Ambientes sujeitos a guerra eletrônica impõem riscos constantes de interferência, *jamming* e *spoofing*. Horowitz (2016) já chamava atenção para esse problema no debate sobre SAAL, enquanto estudos recentes como o de Wang *et al.* (2020) sobre controle tolerante a falhas em UAVs e relatórios do UNIDIR (2023) reforçam a necessidade de enlaces de dados redundantes, criptografia robusta e protocolos tolerantes a falhas. Em alguns casos, arquiteturas com capacidade de operação em modo degradado são preferenciais para assegurar continuidade de missão mesmo sob severa perda de conectividade.

Outra tendência é a adoção do conceito de missão adaptativa, no qual o sistema reconfigura seus objetivos e rotas durante o voo com base em dados de sensores e atualizações do ambiente operacional. Isso requer arquiteturas com elevada capacidade de processamento em tempo real e algoritmos capazes de operar sob incerteza. O artigo de Bekmezci *et al.* (2013) sobre redes ad

hoc de UAVs, isto é, redes temporárias formadas entre os próprios drones em voo conhecidas como FANETs (*Flying Ad Hoc Networks*), e trabalhos como o de Wang *et al.* (2020) confirmam a relevância dessa abordagem.

A integração de armamentos letais em plataformas autônomas adiciona camadas adicionais de complexidade. São necessários mecanismos de autorização, sistemas de supervisão remota, camadas de segurança lógica e redundância física, especialmente em missões de risco elevado. Referências como Russell e Norvig (2021) reforçam que esses sistemas devem ser validados continuamente por meio de ciclos rigorosos de simulação, com foco em segurança funcional (isto é, garantir que o sistema continue operando de forma segura mesmo em caso de falhas), confiabilidade e performance sob estresse operacional.

A arquitetura de SARP armados com capacidades autônomas deve ser concebida como um sistema altamente integrado, no qual confiabilidade, adaptabilidade, segurança e interoperabilidade não são meros requisitos técnicos, mas condições estratégicas para o êxito da missão. A maturidade dessas arquiteturas é um indicador crítico do grau de prontidão tecnológica dos SAAL e sua viabilidade operacional em cenários reais.

1.3.5 Plataformas aéreas internacionais de referência

A literatura especializada oferece uma gama significativa de estudos de caso sobre plataformas de veículos aéreos não tripulados armados, que ilustram diferentes níveis de maturidade tecnológica e graus de autonomia. A análise dessas experiências é fundamental para compreender o estado atual da arte, identificar tendências de integração tecnológica e avaliar a aplicabilidade de tais modelos ao contexto brasileiro.

O MQ-9 Reaper, desenvolvido pela General Atomics e amplamente utilizado pelos Estados Unidos, é uma das plataformas mais estudadas. Com autonomia superior a 27 horas, integração de sensores EO/IR²⁰, radar e enlaces via satélite, o Reaper opera sob supervisão humana, embora incorpore subsistemas com elevado grau de automação. Estudos apontam que o sistema se encontra em transição gradual para capacidades de maior autonomia decisória, especialmente em funções de vigilância e classificação de alvos (General Atomics Aeronautical Systems, 2025b).

²⁰ EO/IR (Electro-Optical/Infrared): sensores ópticos e infravermelhos que capturam imagens em diferentes faixas do espectro eletromagnético.

A Figura 5 ilustra o MQ-9 Reaper, uma das principais plataformas aéreas letais utilizadas pelos Estados Unidos. Esse SARP exemplifica o avanço da autonomia operacional integrada a sensores de alta precisão e sistemas de armamento controlado remotamente, representando uma das referências tecnológicas para missões de vigilância, ataque e interdição com mínima supervisão humana.

Figura 5 - MQ-9 Reaper (EUA): Plataforma MALE



Fonte: General Atomics, 2025b

O Bayraktar TB2, fabricado pela empresa turca Baykar, destaca-se pelo custo relativamente acessível, sua eficácia comprovada em operações reais e a capacidade de operar em missões cooperativas com múltiplas unidades. A plataforma integra sensores eletro-ópticos, armamentos guiados e enlaces de dados seguros, sendo amplamente empregada em conflitos recentes, como na Síria, Líbia e Nagorno-Karabakh. O TB2 tem sido utilizado com elevada eficiência tática, inclusive em missões com características de comportamento *swarm* ou em coordenação com sistemas terrestres (Sayler, 2024; Kallenborn, 2018; Péria-Peigné, 2023; ODIN/TRADOC, 2025).

O Bayraktar TB2, de origem turca, ganhou notoriedade ao ser empregado em conflitos na Líbia, Síria, Nagorno-Karabakh e Ucrânia. Seu custo relativamente baixo, combinado com sensores de médio alcance e capacidade de ataque com supervisão remota, permitiu sua difusão como ferramenta tática eficaz (Péria-Peigné, 2023).

Utilizado em diversos conflitos, o TB2 tornou-se símbolo da capacidade de projeção turca por meio de sistemas acessíveis e eficazes, com controle remoto e integração em rede.

Figura 6 - Bayraktar TB2 (Turquia): Drone tático de médio alcance



Fonte: Baykar Defense, 2025

Mais recentemente, a Turquia desenvolveu o Bayraktar Akıncı, uma plataforma de maior porte e autonomia, com sensores avançados, radar AESA e integração de inteligência artificial. Com maior carga útil e capacidades de guerra eletrônica, o Akıncı posiciona-se como vetor estratégico na doutrina turca de combate aéreo não tripulado.

O Akıncı representa um salto tecnológico em relação ao TB2, com radar AESA, sensores de guerra eletrônica e integração de inteligência artificial. Suas capacidades de ataque e vigilância o posicionam como vetor estratégico da nova doutrina turca de combate aéreo não tripulado.

A Figura 7 mostra a versão mais moderna do drone turco Bayraktar Akıncı que incorpora radar AESA, sensores de guerra eletrônica e capacidade de operação com IA embarcada, ampliando o escopo de aplicação em operações complexas (Baykar, 2025).

Figura 7 - Plataforma Bayraktar Akıncı (Turquia)



Fonte: Baykar Defense, 2025

O sistema Harop, desenvolvido por Israel Aerospace Industries (IAI), representa uma classe distinta: a das munições loitering. Com sensores embarcados e lógica decisória parcialmente autônoma, o Harop pode identificar, perseguir e colidir com alvos de forma semi-independente, sendo classificado como precursor técnico dos SAAL. Seu uso operacional tem sido documentado em conflitos no Oriente Médio e no Cáucaso, levantando debates sobre a linha tênue entre armas guiadas e autonomia letal (IAI, 2025; Bode; Watts, 2023).

Diferentemente de plataformas tradicionais, seu objetivo é permanecer em voo até identificar, perseguir e colidir com um alvo, destruindo-se no processo. Possui alta autonomia de decisão embarcada, sendo considerado um precursor dos SAAL.

O Harop é um exemplo pioneiro de arma autônoma letal. Com capacidade de localizar, perseguir e colidir com alvos de forma autônoma, é operado por Israel e países parceiros como ferramenta de precisão e negação de área.

Figura 8 - IAI Harop (Israel)



Fonte: IAI

A China tem avançado significativamente com o Wing Loong II, desenvolvido pela Chengdu Aircraft Industry Group. A plataforma é comparável ao Reaper em configuração e desempenho, sendo exportada para diversos países do Oriente Médio, África e Ásia. Estudos apontam que o Wing Loong II integra sensores avançados, mísseis guiados e softwares de navegação com funções autônomas, sendo também utilizado como instrumento de influência geopolítica e cooperação técnico-militar (Kania, 2019; Shaikh; Rumbaugh, 2020).

A plataforma apresenta sensores eletro-ópticos, radar SAR e mísseis guiados, com capacidade de exportação significativa. Já foi empregada por países do Oriente Médio, África e Ásia, consolidando-se como alternativa viável aos drones ocidentais.

Figura 9 - Wing Loong II (China): Sistema com e múltiplos sensores embarcados.



Fonte: Chengdu Aircraft Industry Group

Semelhante ao Reaper em arquitetura, o Wing Loong II é amplamente exportado para países da África e Oriente Médio. Opera com sensores eletro-ópticos, radar SAR e armamentos guiados, consolidando a China como provedora global de tecnologia militar autônoma.

Outros exemplos incluem o Taranis, do Reino Unido, que testou funções de navegação e ataque autônomo; o Okhotnik-B, da Rússia, com capacidade furtiva e interface de comando colaborativa com caças tripulados; e o GJ-11 Sharp Sword, da China, focado em furtividade e operações em ambientes A2/AD (Anti-Access/Area Denial), todos ainda em fase de testes avançados, mas com potencial de redefinir os paradigmas de emprego de drones armados autônomos (Sayler, 2024; Rostec, 2022; CRS, 2024).

A análise dessas plataformas internacionais demonstra que a tendência predominante no desenvolvimento de sistemas de armas letais autônomas em meios aéreos é a adoção de uma estratégia incremental. Em vez de buscar soluções integralmente autônomas desde o início, os países optam por incorporar gradualmente funções autônomas em plataformas já consolidadas, permitindo validar algoritmos, testar subsistemas críticos e mitigar riscos operacionais, políticos e éticos associados à delegação de decisão letal a máquinas.

Essa abordagem evolutiva tem implicações diretas para o contexto brasileiro. Para a MB e a BID nacional, o estudo dessas experiências possibilita extrair lições valiosas sobre modelos de aquisição, processos de certificação, estratégias de nacionalização tecnológica e parâmetros operacionais adaptados ao ambiente marítimo. Em especial, oferecem subsídios para refletir sobre requisitos como alcance, persistência, integração sensorial e resiliência em comunicações para atuação sobre a Amazônia Azul, uma área de vigilância complexa, extensa e de elevado valor estratégico.

1.3.6 Lacunas e oportunidades na literatura nacional

No contexto brasileiro, os estudos técnico-científicos sobre o desenvolvimento e o emprego de sistemas de armas autônomas letais e de plataformas aéreas remotamente pilotadas com capacidades autônomas têm sido tratados de forma limitada e fragmentada, especialmente quando contrastados com a literatura internacional. Embora existam contribuições relevantes nos campos jurídico, ético e político, com foco nas implicações do uso de sistemas de armas autônomas letais à luz do Direito Internacional Humanitário, da governança global e do controle de armamentos, observa-se um menor volume de estudos voltados à viabilidade técnica, à integração sensorial, à inteligência artificial embarcada e aos desafios operacionais no contexto nacional (Silva, 2022; FUNAG, 2020).

Esse descompasso se reflete especialmente nas seguintes lacunas:

- Ausência de estudos empíricos sobre o desempenho de sensores em ambientes tropicais e marítimos, cujas variáveis atmosféricas e oceanográficas apresentam alta variabilidade;
- Pouca pesquisa aplicada em algoritmos embarcados de tomada de decisão sob incerteza, voltada a cenários típicos da realidade brasileira;
- Carência de simulações operacionais com SARP armados em ambientes hostis, como áreas de guerra eletrônica, falhas de comunicação e restrições logísticas do litoral e da Amazônia Azul;
- Falta de arquiteturas sistêmicas projetadas especificamente para drones de médio porte com foco em autonomia energética e resiliência;
- Escassez de prototipagem rápida e validação em ciclos curtos, com realimentação entre engenharia de sistemas, inteligência artificial e doutrina operacional.

No entanto, existem iniciativas promissoras que indicam a capacidade instalada no país. O caso do Sistema Nauru, desenvolvido pela empresa Xmobots, é frequentemente citado como um exemplo relevante de aplicação de tecnologias autônomas. O Nauru emprega sensores eletro-ópticos, navegação autônoma e lógica de missão programável, e representa um possível ponto de partida para a evolução rumo à letalidade embarcada (Xmobots, 2025a).

No âmbito acadêmico, observam-se iniciativas e linhas de pesquisa com potencial de contribuição para o desenvolvimento de capacidades autônomas, conduzidas por diferentes instituições de ensino e pesquisa no país, entre as quais se incluem:

- Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), com pesquisas em controle embarcado, robótica aérea e inteligência artificial aplicada a sistemas autônomos, desenvolvidas em grupos como o Laboratório de Robótica e Inteligência Computacional (LAR);
- Instituto Militar de Engenharia (IME), com estudos voltados a sensores, defesa cibernética e simulações computacionais aplicadas ao campo da segurança e da defesa;
- COPPE/UFRJ, com pesquisas em percepção situacional e fusão de dados aplicadas ao monitoramento autônomo, além do desenvolvimento de sistemas de controle para veículos autônomos (Nascimento, 2025; COPPE/UFRJ, s.d.)
- Universidade de Brasília (UnB), com iniciativas em robótica, sistemas embarcados e desenvolvimento de algoritmos aplicados a veículos autônomos terrestres (UNB, s.d.).

Apesar desse potencial acadêmico, o contexto institucional brasileiro ainda é marcado por limitações persistentes na articulação entre a produção científica, a Base Industrial de Defesa e as demandas operacionais das Forças Armadas.

Esse cenário tem sido associado à fragmentação institucional, ao baixo volume de investimentos em pesquisa de uso dual e à limitada disponibilidade de mecanismos de fomento voltados à integração tecnológica aplicada ao setor de defesa (Amarante, 2012).

Outro fator limitante é o grau de confidencialidade associado a projetos militares emergentes, o que restringe a divulgação de dados técnicos e inibe a formação de massa crítica na academia e na indústria. Ainda assim, esse cenário representa uma oportunidade estratégica para o Brasil, especialmente se forem mobilizados instrumentos de fomento coordenado, como os editais Finep Defesa, CNPq/MCTI, Capes Defesa e os projetos de offset tecnológico vinculados a aquisições internacionais.

O fortalecimento de programas integrados de pós-graduação, a criação de laboratórios de experimentação simulada, o desenvolvimento de bases de dados nacionais para treinamento de algoritmos e a consolidação de polos regionais de pesquisa são caminhos concretos para ampliar a capacidade do país em tecnologias autônomas embarcadas. Há espaço, inclusive, para políticas públicas que estimulem a interoperabilidade entre setores civil e militar, com ênfase em tecnologias de duplo uso e certificações de exportação (CAPES/Pró-Defesa V, 2023; MCTI/ENCTI, 2016-2022).

Assim, a literatura nacional demanda uma abordagem mais sistêmica, voltada à articulação dos domínios técnico, operacional e estratégico. A superação das lacunas identificadas requer esforços coordenados entre universidades, centros tecnológicos, indústrias e órgãos de planejamento da Defesa, com o objetivo de construir uma base doutrinária e tecnológica robusta, que posicione o Brasil como ator relevante no debate e no uso de tecnologias autônomas letais embarcadas em SARP.

1.3.7 Considerações sobre uso dual e implicações estratégicas

A literatura especializada destaca que a maior parte das tecnologias empregadas em SAAL e em plataformas de veículos aéreos não tripulados armados possui forte caráter de uso dual, ou seja, apresentam aplicações tanto civis quanto militares. Essa característica torna a distinção entre tecnologias de defesa e de uso comercial cada vez mais tênue, desafiando os mecanismos tradicionais de controle, regulação e desenvolvimento industrial (Boulain; Verbruggen, 2017; UNIDIR, 2021).

Componentes críticos como sensores ópticos e infravermelhos, algoritmos de inteligência artificial, enlaces de dados criptografados, baterias de alta densidade, sistemas de posicionamento e circuitos integrados são amplamente utilizados em setores civis, como logística, mobilidade urbana, agricultura de precisão, segurança pública e monitoramento ambiental. Simultaneamente, esses mesmos elementos estão presentes em plataformas letais ou de vigilância militar, evidenciando a interdependência entre os dois domínios (Center for the Study of the Drone, 2019; Saylor, 2024).

A dualidade tecnológica traz implicações estratégicas relevantes. Do ponto de vista técnico-industrial, ela permite que inovações civis alimentem o setor de defesa com soluções mais baratas, escaláveis e de rápida atualização, especialmente em áreas como robótica, visão computacional, navegação autônoma e redes neurais leves. Inversamente, desenvolvimentos militares, especialmente no campo da miniaturização, da resistência a ambientes hostis e da segurança cibernética, tendem a migrar para aplicações civis, criando externalidades positivas para o mercado (Kania, 2019).

Por outro lado, a convergência entre os setores civil e militar amplia os riscos de proliferação tecnológica, com o possível acesso de grupos não estatais ou regimes instáveis a tecnologias antes restritas. Essa preocupação é especialmente sensível no caso de drones armados com algoritmos de reconhecimento automático de alvos, cuja adaptação técnica pode ser feita a partir de plataformas comerciais modificadas. A literatura aponta que a presença de componentes de uso dual dificulta o controle de exportações e desafia os regimes multilaterais de não proliferação (ICCT, 2022; West Point, 2025; Center for a New American Security - CNAS 2024).

A dualidade também impacta a formação de cadeias produtivas e a política industrial de defesa. Países que conseguem estruturar ecossistemas industriais flexíveis, integrando empresas civis inovadoras com setores militares, tendem a obter ganhos em escala, redução de custos, maior capacidade de exportação e reinvestimento em pesquisa aplicada. Modelos como os de Israel, China e Turquia demonstram a viabilidade dessa estratégia, com sinergias reais entre indústria civil, centros de pesquisa e ministérios da defesa (Kania, 2019; Péria-Peigné, 2023; INSS, 2020).

No caso do Brasil, compreender e explorar o caráter dual das tecnologias autônomas é fundamental para orientar políticas públicas e decisões estratégicas de investimento. A BID pode se beneficiar ao estabelecer parcerias com setores civis dinâmicos, como agricultura de precisão, energia renovável, mineração autônoma e logística aérea remota. Além disso, é

essencial adotar políticas de proteção à propriedade intelectual, segurança da informação, certificação de exportações e promoção de conteúdo nacional (BRASIL, 2020).

A literatura nacional também sugere que o uso dual pode ser um vetor de fortalecimento da autonomia tecnológica, desde que acompanhado de planejamento estratégico e coordenação institucional. A crescente dependência externa em insumos críticos, como microprocessadores, giroscópios, sensores ópticos, GNSS e sistemas embarcados, representa um risco à soberania operacional das FA, especialmente em cenários de ruptura logística ou bloqueio comercial (Moreira, 2013).

Nesse sentido, há consenso entre autores brasileiros e estrangeiros sobre a necessidade de desenvolver uma estratégia nacional para tecnologias de uso dual, articulando incentivos à pesquisa, instrumentos regulatórios e políticas de offset tecnológico. Tal estratégia deve promover a interoperabilidade entre plataformas civis e militares, o fomento à inovação em áreas críticas e a capacitação de recursos humanos qualificados, integrando governo, FA, indústria e academia.

O uso dual não deve ser compreendido apenas como uma vantagem industrial, mas como um elemento central da dissuasão estratégica e da resiliência nacional. Países que dominam tecnologias autônomas em setores civis tendem a responder com mais agilidade a ameaças emergentes, desenvolver capacidades defensivas adaptativas e reduzir sua vulnerabilidade em ambientes geopolíticos instáveis. Para o Brasil, isso representa não apenas uma oportunidade, mas uma necessidade.

1.4 Diretrizes e Documentos Estratégicos da Defesa Brasileira

A compreensão das diretrizes nacionais de defesa é essencial para contextualizar o desenvolvimento e a possível integração de tecnologias autônomas letais em plataformas como os SARP. A literatura e os documentos estratégicos oficiais do Estado brasileiro revelam uma trajetória de valorização da ciência, tecnologia e inovação como pilares da autonomia estratégica em defesa. Embora o tema das armas autônomas letais ainda não esteja diretamente mencionado em muitas dessas diretrizes, os fundamentos para sua viabilidade e incorporação tecnológica estão presentes em diversas formulações (BRASIL, 2025).

Entre os principais documentos de referência estão:

- Política Nacional de Defesa (PND);
- Estratégia Nacional de Defesa (END);
- Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN);

- Plano Estratégico da Marinha (PEM)²¹;
- Catálogos e Agendas da BID;
- Diretrizes dos Comandos Militares e dos Programas Estratégicos das FA.

A PND e a END destacam o fortalecimento da autonomia nacional como eixo estruturante da Defesa. Ambas reconhecem a importância de investimentos em tecnologias disruptivas, incluindo inteligência artificial, robótica, guerra cibernética e sistemas não tripulados (BRASIL, 2025). A END, especialmente em suas versões mais recentes, enfatiza a necessidade de domínio de tecnologias sensíveis como sensores avançados, propulsão, comando e controle, comunicações seguras e satélites, componentes fundamentais para qualquer sistema autônomo embarcado.

O Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN) apresenta os eixos estruturantes da defesa brasileira, os projetos estratégicos em andamento e a visão do país sobre ameaças e oportunidades no ambiente de segurança internacional. O LBDN reforça a importância da vigilância contínua da Amazônia Azul, a proteção das infraestruturas críticas offshore e o monitoramento de áreas marítimas de interesse estratégico (BRASIL, 2025). Embora o termo SAAL não seja empregado, o documento destaca a necessidade de modernizar os meios de sensoriamento remoto, aumentar a capacidade de resposta a ameaças assimétricas e investir em tecnologias emergentes, todas condições necessárias para a adoção de sistemas autônomos com capacidade letal.

O PEM é ainda mais direto na proposição do uso de sistemas não tripulados. Entre os objetivos estratégicos está a integração de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) e sistemas autônomos navais para ampliar a cobertura de vigilância e reduzir a exposição de meios tripulados. O PEM também ressalta a necessidade de maior sinergia entre as áreas de operação, logística, ciência e tecnologia, sugerindo um ambiente favorável à adaptação de plataformas como o Nauru para funções de maior autonomia e eventual capacidade ofensiva (BRASIL, 2025).

²¹ A Marinha do Brasil tem publicado novos documentos de natureza doutrinária e estratégica que atualizam seu arcabouço conceitual e institucional. Destaca-se o Fundamento Doutrinário da Marinha (FDM), formalizado como o documento EMA-301, 1ª edição, de 2023, que estabelece as bases doutrinárias para o emprego do Poder Naval. As diretrizes da Estratégia de Defesa da Marinha (EDM), por sua vez, não se apresentam como um documento único e autônomo, estando alinhadas à Estratégia Nacional de Defesa (END), à Política Nacional de Defesa (PND) e ao Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN), atualizados pelo Decreto nº 12.725, de 18 de novembro de 2025. Até o momento da elaboração deste relatório, o PEM-2040 não havia sido formalmente revogado ou substituído por ato normativo público, permanecendo como documento de referência institucional para o planejamento de longo prazo da Marinha do Brasil (BRASIL, 2025).

Outro aspecto abordado nos documentos estratégicos diz respeito à sustentabilidade da BID, apontada como elemento essencial da soberania nacional, com capacidade para inovar, produzir e sustentar os meios necessários à defesa. A política de fortalecimento da BID menciona explicitamente a importância das parcerias com universidades, centros de pesquisa e empresas de base tecnológica, o que amplia o espaço institucional para projetos de uso dual e inovação incremental (BRASIL, 2025).

Embora não haja, até o momento, um programa específico de desenvolvimento de SAAL no Brasil, os documentos estratégicos abrem espaço normativo e doutrinário para o amadurecimento de capacidades autônomas integradas. A abordagem brasileira tem se caracterizado por cautela e responsabilidade, mas com abertura à inovação, desde que compatível com o Direito Internacional Humanitário e com os compromissos multilaterais assumidos pelo país.

Observa-se que a tendência institucional é evoluir gradualmente na direção de uma maior autonomia tecnológica, com ênfase em projetos que atendam às especificidades do teatro operacional brasileiro: grandes distâncias, comunicação intermitente, ambientes de baixa densidade populacional e presença de ameaças não convencionais. Nesse cenário, os SARP armados com funções autônomas emergem como alternativa viável e estratégica, cuja viabilidade está condicionada à articulação entre as diretrizes políticas, os programas militares e a capacidade industrial e científica nacional.

A análise das diretrizes e documentos estratégicos da Defesa Brasileira revela um ambiente institucional propício à inovação tecnológica em sistemas de defesa, com potencial para a incorporação progressiva de funções autônomas em SARP. Essa análise é essencial para balizar os limites e as oportunidades de aplicação prática das tecnologias discutidas neste trabalho.

1.5 Considerações finais do Capítulo 1

A análise teórico-conceitual desenvolvida neste capítulo construiu os alicerces para a investigação sobre a integração de tecnologias autônomas letais em SARP no contexto da MB. Os conceitos abordados, embora ainda em processo de consolidação no plano internacional, fornecem um arcabouço essencial para a compreensão técnica, normativa e estratégica dessas capacidades emergentes.

O primeiro bloco, dedicado aos conceitos-chave, evidenciou a importância de distinguir entre drones e SARP, automação e autonomia, bem como de classificar os diferentes níveis de independência decisória dos sistemas. A definição dos graus de autonomia, com base em

modelos funcionais, interacionais e operacionais, mostrou-se fundamental para a identificação de requisitos técnicos e doutrinários, especialmente no que se refere à supervisão humana em missões de potencial letalidade.

Em seguida, a análise dos marcos regulatórios internacionais e dos debates multilaterais revelou um cenário de disputas conceituais e diplomáticas. Apesar da ausência de consenso quanto à definição formal de SAAL, as discussões avançaram em torno da preservação do controle humano significativo, da responsabilização legal e da mitigação de riscos estratégicos. A posição do Brasil, marcada pela prudência normativa e pelo compromisso com o Direito Internacional Humanitário, destaca a necessidade de acompanhar a evolução dessas normas, a fim de evitar futuras restrições à inovação nacional.

A revisão da literatura técnico-científica, apresentada no terceiro bloco, expôs a complexidade inerente às tecnologias associadas à letalidade autônoma. Embora a produção nacional ainda careça de estudos empíricos aplicados à realidade operacional brasileira, foram identificados avanços promissores, sobretudo em áreas como percepção sensorial, inteligência artificial embarcada, arquitetura de sistemas, autonomia energética e segurança operacional. O conceito de uso dual, amplamente discutido, revelou tanto oportunidades para o fortalecimento da BID quanto desafios adicionais de controle e normatização.

Por fim, a análise das diretrizes e documentos estratégicos da defesa brasileira demonstrou que, embora os SAAL ainda não sejam formalmente contemplados nas políticas nacionais, há espaço doutrinário e institucional para o desenvolvimento de tecnologias autônomas integradas. Documentos como a Política Nacional de Defesa, o Plano Estratégico da Marinha e a Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (EMA-415, 2024) evidenciam uma convergência em torno da ampliação da autonomia tecnológica, da sustentabilidade da BID e da inserção de tecnologias disruptivas no planejamento estratégico da força naval.

Este capítulo oferece, portanto, os fundamentos teóricos que sustentam os próximos capítulos deste relatório. A partir das bases aqui estabelecidas, o trabalho avançará para a investigação das tendências tecnológicas mais atuais (Capítulo 2), da análise da viabilidade de adaptação dessas capacidades ao cenário nacional (Capítulo 3) e da discussão crítica sobre as possibilidades de aplicação real na MB (Capítulo 4). A centralidade da autonomia, em seus múltiplos sentidos, permanecerá como eixo estruturante ao longo de toda a investigação.

2 CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

Este capítulo analisa o estado da arte dos Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP) com funções autônomas, com ênfase em suas aplicações militares. A análise abrange tanto os avanços tecnológicos que têm impulsionado a evolução desses sistemas quanto as tendências emergentes que moldam seu desenvolvimento futuro, incluindo a integração de inteligência artificial e novos paradigmas de operação autônoma. O capítulo fundamenta-se em sistemas de referência internacional e examina os impactos dessas tecnologias no campo de batalha, destacando reflexos operacionais observados em conflitos recentes. Por fim, são discutidos os desafios específicos enfrentados pelo Brasil no esforço de adaptação e desenvolvimento de capacidades autônomas compatíveis com os requisitos da defesa nacional.

2.1 Sistemas Atuais e Tendências

Esta seção apresenta uma análise do estado da arte em SARP armados com funções autônomas, com ênfase nos modelos empregados em operações militares e nas principais inovações tecnológicas embarcadas. São consideradas plataformas de referência amplamente reconhecidas, como o MQ-9 Reaper, o Bayraktar Akıncı e o Wing Loong II, que ilustram diferentes abordagens nacionais para o uso de inteligência artificial e integração com sistemas de comando e controle.

Além disso, são discutidas as tendências emergentes que vêm moldando a próxima geração de sistemas autônomos letais, incluindo o emprego de enxames de drones, o uso de inteligência coletiva para tomada de decisão distribuída e os avanços na autonomia embarcada com base em sensores inteligentes. Tais inovações têm ampliado as possibilidades de operação, mas também trazem desafios técnicos, éticos e estratégicos, especialmente em cenários com infraestrutura limitada, como o ambiente marítimo.

A seção também examina como essas tendências estão sendo operacionalizadas por diferentes países e como influenciam o desenho de futuras plataformas. As descrições técnicas detalhadas das principais aeronaves já empregadas encontram-se consolidadas no item 1.3.5 deste relatório, que serve de base empírica para as análises comparativas desenvolvidas a seguir.

2.1.1 Avanços em Sistemas Autônomos Aéreos de Emprego Militar

A evolução dos SARP tem refletido transformações profundas na guerra moderna, especialmente com a incorporação progressiva de IA embarcada. Originalmente desenvolvidos para missões de vigilância e reconhecimento visual, os SARP passaram a integrar capacidades avançadas de navegação autônoma, detecção automática de ameaças e, mais recentemente, tomada de decisão sem supervisão humana constante. Essa transição para a autonomia, no entanto, não é um processo isolado, mas sim resultado do avanço de várias tecnologias que convergem para melhorar a eficácia e a eficiência desses sistemas. A evolução da capacidade computacional, a miniaturização de sensores e a ampliação das redes de comunicação desempenham papéis centrais nesse processo (Bistrion; Piotrowski, 2021; Boulanin; Verbruggen, 2017).

As técnicas de aprendizado de máquina, particularmente as redes neurais profundas, desempenham um papel fundamental na capacitação dos SARP. A utilização dessas redes permite o reconhecimento de padrões complexos e a fusão de dados sensoriais em tempo real, o que, por sua vez, aumenta a precisão das operações e melhora a tomada de decisão autônoma (Goodfellow *et al.*, 2016).

Essas capacidades têm permitido que os SARP não apenas realizem missões de vigilância, mas também operem de forma autônoma em cenários dinâmicos e complexos, com a capacidade de identificar e engajar alvos com mínima intervenção humana.

De acordo com Boulanin e Verbruggen (2017), o uso de IA em sistemas de armas permite uma detecção e reação mais rápidas, especialmente em ambientes de combate de alta intensidade.

A aplicação militar de IA, embora inovadora, também levanta questões estratégicas e operacionais significativas. A introdução de sistemas de armas autônomas altera substancialmente o caráter dos conflitos contemporâneos, tornando os ataques mais difíceis de prever, de atribuir e de mitigar. Brundage *et al.* (2018) alertam que a utilização de IA nos SARP não só reduz os custos operacionais e amplia a escala de ataques possíveis, como também cria vetores de ameaça. A descentralização do processo decisório, por exemplo, pode levar a uma maior dificuldade em identificar responsabilidades, especialmente em cenários onde a IA toma decisões de engajamento sem supervisão direta ou onde o alvo é tratado de maneira autônoma.

Outro elemento crucial é a resiliência operacional. A capacidade de operar sob condições degradadas ou negadas, como a ausência de GPS ou interferência em enlaces de dados, faz com que esses sistemas sejam mais eficazes diante de tentativas de contramedidas adversárias

(Cummings, 2017). A IA embarcada permite o uso de modelos preditivos e sistemas de navegação alternativos baseados em visão computacional, o que amplia a adaptabilidade e confiabilidade do sistema. Adicionalmente, os algoritmos embarcados estão sendo treinados com bases de dados ampliadas e simuladas, o que aumenta sua robustez e reduz a dependência de conectividade constante com estações de controle.

Esses avanços, no entanto, não se limitam a uma simples atualização tecnológica, mas exigem ajustes profundos nas doutrinas militares e nas estratégias de defesa. A integração de IA em sistemas de armas demanda não apenas um refinamento da teoria da guerra, mas também uma reestruturação nas capacidades nacionais de ciência de dados, segurança cibernética e robótica embarcada. Como apontado por Andrade e Franco (2016), esses novos sistemas de armas exigem uma base tecnológica robusta para garantir a soberania nacional, visto que muitas das tecnologias críticas necessárias para o funcionamento de IA avançada são dominadas por países estrangeiros. A soberania tecnológica, portanto, torna-se um ponto estratégico essencial para qualquer nação que busque desenvolver capacidades militares autônomas.

A publicação “A Implementação de Sistemas Não Tripulados na MB” destaca que, embora trate majoritariamente de sistemas ainda não letais, o domínio sobre sensores embarcados, enlaces seguros de dados e inteligência artificial distribuída constitui uma prioridade estratégica para a consolidação de uma doutrina nacional de sistemas autônomos (MARINHA DO BRASIL, 2023a). O documento também ressalta a necessidade de protocolos de experimentação embarcada para validar algoritmos em ambiente real, o que evidencia uma preocupação institucional com a maturidade tecnológica.

No Brasil, embora não existam sistemas armados com elevado grau de autonomia operacional, há exemplos relevantes de avanço tecnológico no campo dos sistemas aéreos remotamente pilotados. O sistema Nauru 500C, desenvolvido pela XMobots, destaca-se como uma plataforma nacional voltada a missões de vigilância e reconhecimento, integrando sensores eletro-ópticos e capacidades de navegação automatizada. Ainda que seu emprego operacional específico pelas Forças Armadas não seja amplamente detalhado em fontes abertas, sua arquitetura modular sugere potencial para adaptações futuras em diferentes contextos de missão, inclusive no domínio da defesa (Xmobots, 2025b).

Projetos de pesquisa conduzidos em instituições nacionais reforçam a evolução tecnológica nessa área. No Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Lima Filho *et al.*, (2021) desenvolveram um sistema de apoio à decisão para aeronaves de combate não tripuladas baseado em redes neurais artificiais, demonstrando a aplicação de algoritmos embarcados em cenários de combate aéreo além do alcance visual. Já na COPPE/UFRJ, o projeto Minerva

Aerodesign tem se destacado pelo desenvolvimento de UAVs experimentais com sistemas embarcados de controle e aerodinâmica, evidenciando a contribuição acadêmica para a formação de competências em algoritmos de controle e integração de sistemas (Minerva Aerodesign, s.d.).

A perspectiva estratégica de incorporar IA em sistemas militares reflete uma mudança não apenas no uso de tecnologia, mas na própria filosofia de combate. A automação crescente e a integração de IA nos SARP não apenas aumentam a precisão e a velocidade de resposta, mas também criam desafios éticos e regulatórios. A decisão de autorizar um ataque, por exemplo, pode ser delegada a um sistema autônomo, levantando questões sobre responsabilidade, proporcionalidade e a ética do uso da força. Em sua análise, Taddeo e Blanchard (2022) enfatizam que, enquanto a IA pode proporcionar vantagens operacionais, ela também impõe riscos de escalada inadvertida e de operações fora do controle humano.

O desenvolvimento de políticas adequadas para a regulamentação e a supervisão de IA militar se torna crucial para mitigar os riscos dessa tecnologia. Esse processo deve ser acompanhado de investimentos contínuos em pesquisa aplicada, formação de recursos humanos e validação operacional de protótipos em contextos realistas, assegurando que o avanço tecnológico não comprometa os princípios fundamentais da dissuasão, da responsabilidade e da soberania.

2.1.2 Lições de Conflitos Recentes: Ucrânia, Cáucaso e Oriente Médio

O emprego intensivo de SARP em conflitos contemporâneos tem produzido lições operacionais relevantes para o desenvolvimento e a doutrina de uso dessas plataformas. A guerra da Ucrânia, iniciada em fevereiro de 2022, consolidou o uso massivo de drones em múltiplas camadas do campo de batalha, tanto por forças regulares quanto por grupos irregulares. Desde o uso de plataformas comerciais como os DJI Mavic e Matrice para vigilância, correção de fogo de artilharia e lançamentos improvisados de granadas, até a aplicação de sistemas militares avançados como o Bayraktar TB2, a guerra revelou uma ampla gama de aplicações táticas e estratégicas para os SARP (Plichta, 2025).

Um dos principais aprendizados do conflito ucraniano foi o impacto disruptivo da saturação de drones de baixo custo no campo de batalha. A combinação de ISR com mobilidade aérea acessível permitiu que unidades táticas tivessem consciência situacional quase em tempo real. Contudo, a eficácia dessas plataformas enfrentou limitações importantes diante de ambientes com forte presença de guerra eletrônica, interferência GNSS e negação de

comunicações (UNITED KINGDOM, 2023). A necessidade de integração com sistemas robustos de C4ISR e a vulnerabilidade a ataques cibernéticos foram lições críticas para o futuro desenvolvimento de sistemas autônomos militares.

No Cáucaso, a guerra de Nagorno-Karabakh em 2020 entre Azerbaijão e Armênia demonstrou a aplicação de drones armados de forma sistemática para supressão de defesas aéreas, coordenação de ataques terrestres e desorganização da cadeia de comando inimiga. O uso articulado de Bayraktar TB2 e *loitering munitions* Harop permitiu ao Azerbaijão destruir baterias antiaéreas e centros de comando, estabelecendo superioridade tática sem necessidade de superioridade aérea convencional (Angelov, 2022).

A guerra revelou o valor de sistemas de inteligência de sinais embarcados em drones e a importância da descentralização do controle operacional, permitindo respostas mais ágeis frente às mudanças no campo de batalha (Shaikh; Rumbaugh, 2020).

No Oriente Médio, especialmente em conflitos como a Guerra do Iêmen e na campanha contra o Estado Islâmico, observou-se uma crescente sofisticação no emprego de SARP por atores estatais e não estatais. Os drones foram utilizados não apenas para vigilância e ataques de precisão, mas também como vetores de terror e desgaste estratégico. A coalizão liderada pela Arábia Saudita, por exemplo, enfrentou ataques de drones de ataque unidirecional lançados por forças houthis, revelando a viabilidade de sistemas de baixo custo e alta letalidade, produzidos localmente ou com apoio externo (UN, 2022; SIPRI, 2025).

A despeito das inovações, esses conflitos também expuseram vulnerabilidades significativas. Em diversas ocasiões, drones comerciais e militares foram neutralizados por bloqueadores de sinal, *spoofing* de GPS, *jamming* e medidas cibernéticas ofensivas. A necessidade de sistemas embarcados mais autônomos, capazes de operar com degradação de enlace e resistência a interferências, tornou-se evidente. Isso implica investimentos em IA embarcada, navegação inercial, redes neurais robustas e módulos de tomada de decisão local, com maior independência do controle remoto humano (Cummings, 2017; CICV, 2019).

Outra lição extraída desses teatros de operações diz respeito à integração operacional dos SARP com forças convencionais. Em contextos assimétricos, como o Iêmen e a Síria, os drones mostraram ser ferramentas de multiplicação de força, permitindo que pequenos grupos com conhecimento técnico limitado infligissem danos significativos a forças regulares. Em contrapartida, em cenários de guerra de alta intensidade, como a Ucrânia, a eficácia dos SARP depende fortemente de sua integração com sistemas maiores de comando, controle e inteligência, o que inclui a compatibilidade com redes táticas, protocolos interoperáveis e capacidade de operar em ambientes contestados (Plichta, 2025).

No caso do Brasil, as lições observadas nesses conflitos reforçam a importância de desenvolver uma doutrina nacional específica para o uso de SARP, com ênfase na resiliência cibernética, na integração com sensores navais e no uso adaptado a ambientes litorâneos e marítimos. A vigilância da Amazônia Azul exige sistemas com elevada autonomia de voo, sensores redundantes e capacidade de operar sob enlaces intermitentes, o que evidencia a necessidade de amadurecimento doutrinário e tecnológico no âmbito naval (MARINHA DO BRASIL, 2023b).

Os conflitos recentes demonstram que os SARP deixaram de ser meros vetores de vigilância para se tornarem elementos centrais nas estratégias militares modernas. Sua eficácia está diretamente relacionada à capacidade de resistir a ambientes hostis do ponto de vista eletrônico, à qualidade de sua inteligência embarcada e à doutrina que orienta seu uso. Para o Brasil, essas lições devem nortear o desenvolvimento de capacidades autônomas alinhadas à realidade estratégica do Atlântico Sul, com foco em vigilância persistente, defesa costeira e interoperabilidade entre plataformas navais, aéreas e terrestres.

2.1.3 Enxames de Drones e Inteligência Coletiva

Uma das inovações mais disruptivas no campo dos sistemas autônomos militares é o desenvolvimento de enxames de drones, que consistem em dezenas ou até centenas de plataformas leves operando de forma cooperativa. Esses enxames são controlados por algoritmos distribuídos inspirados em padrões de comportamento observados na natureza, como em colônias de formigas, enxames de abelhas e cardumes. A ideia central é a criação de uma inteligência coletiva emergente, capaz de garantir resiliência, redundância, adaptação tática em tempo real e independência de comando centralizado (Brambilla *et al.*, 2013).

Ao contrário dos sistemas convencionais controlados por um operador humano ou um centro de comando fixo, os drones em enxame são projetados para operar com coordenação descentralizada, permitindo que tomem decisões coletivas com base em dados locais e comunicações entre as unidades. Essa abordagem resulta em maior robustez, pois, se um ou mais drones forem neutralizados, os demais conseguem continuar a missão sem comprometer o funcionamento do grupo.

A arquitetura descentralizada também aumenta a capacidade de adaptação, já que cada unidade pode reconfigurar seu papel conforme as mudanças no ambiente operacional. A literatura técnica enfatiza que a resiliência desses sistemas depende de tolerância à perda de

enlace, interferência e falhas dos agentes, além de mecanismos de recomposição da missão (Sahin, 2005).

Nos Estados Unidos, um dos programas mais avançados nesse campo é o OFFSET (*Offensive Swarm-Enabled Tactics*), desenvolvido pela DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*). O programa descreve o emprego de enxames de até 250 plataformas aéreas e terrestres não tripuladas por pequenas frações de infantaria, com ênfase em ambientes urbanos complexos, autonomia colaborativa e *human-swarm teaming*. A documentação oficial apresenta objetivos de gerar, avaliar e integrar táticas de enxame por meio de interfaces imersivas, experimentação ao vivo e repositórios de táticas. Também registra experimentos de campo com centenas de agentes, combinando plataformas físicas e virtuais (DARPA, 2021a; DARPA, 2021b).

Esses sistemas empregam técnicas de aprendizado de máquina e visão computacional embarcada para que cada drone compreenda seu papel no coletivo e ajuste seu comportamento com base no fluxo de dados recebido de seus pares. Assim, o enxame age como um sistema distribuído de sensores e efetores, capaz de mapear áreas, identificar alvos e realizar missões com mínima supervisão humana. A viabilidade operacional está associada a superar limitações de latência de comunicação, perturbações de guerra eletrônica e coordenação em cenários hostis (Sahin, 2005).

Israel tem avançado significativamente na operacionalização de enxames de drones, como demonstrado em operações realizadas em Gaza. Em 2021, foram relatadas missões com pequenos drones lançados em conjunto para reconhecimento e saturação de alvos, muitas vezes usados em coordenação com sistemas tripulados e munições guiadas (Kallenborn, 2022). Essa estratégia revelou o potencial dos enxames para substituir operações de alto risco envolvendo tropas terrestres, além de criar confusão entre os sensores de defesa inimigos.

A China, por sua vez, também tem investido em pesquisa e desenvolvimento intensivo nesta área. Em 2020, realizou um teste público no qual 48 drones foram lançados de uma unidade móvel, demonstrando coordenação automatizada em voo e reação a obstáculos. Mais recentemente, a empresa CETC (*China Electronics Technology Group Corporation*) anunciou a criação de protótipos com capacidade de dividir-se em múltiplos vetores durante o voo, ampliando a flexibilidade da missão (Pickrell, 2020). Além disso, vídeos oficiais chineses demonstraram drones terrestres e aéreos operando em conjunto sob o conceito de combate multidomínio, coordenados por IA embarcada.

O uso de inteligência coletiva nesses sistemas não se limita à simples cooperação. A estratégia está em tornar o sistema resiliente, proativo e adaptável, mesmo em ambientes

contestados por guerra eletrônica. Isso implica o uso de canais de comunicação redundantes, processamento embarcado de decisões e algoritmos de consenso. Tais capacidades são consideradas centrais para o futuro do combate em zonas negadas, onde o acesso à informação e a latência de comando podem inviabilizar operações tradicionais.

Outro aspecto fundamental é o potencial de saturação e dissuasão que os enxames representam. Diferentemente de um ataque com um único drone de alta performance, um enxame pode sobrecarregar sensores e sistemas de defesa do inimigo, obrigando o uso de múltiplos interceptadores e ampliando o custo e a complexidade da defesa. Isso torna os enxames particularmente úteis para missões de primeiro ataque ou para abertura de corredores aéreos para forças convencionais. Em termos estratégicos, essa abordagem representa um novo paradigma operacional que combina volume, dispersão e adaptabilidade (Scharre, 2018).

Do ponto de vista técnico, os desafios permanecem significativos. A autonomia distribuída exige sensores precisos, processadores embarcados com baixo consumo energético, algoritmos de navegação robustos e sistemas de comunicação tolerantes a falhas. Além disso, a validação e certificação de tais sistemas enfrentam barreiras éticas e legais, especialmente quanto à atribuição de responsabilidade em casos de engajamento autônomo (CICV, 2021).

Para o Brasil, apesar de ainda estar distante de um programa operacional de enxames autônomos, o domínio desses conceitos é estratégico. O documento “A Implementação de Sistemas Não Tripulados na MB” (2023) aponta a importância de acompanhar o desenvolvimento de tecnologias emergentes que impactem a guerra naval e a vigilância da Amazônia Azul. Enxames de drones, mesmo em formato reduzido, poderiam ser empregados para detecção de ameaças em larga escala, resposta rápida a incidentes e apoio a forças especiais em áreas isoladas.

Conforme alerta Kallenborn (2022), a proliferação de capacidades de enxame entre atores estatais e não estatais deve levar à adoção de novas doutrinas de defesa e à revisão dos conceitos de dissuasão. Combinados a IA embarcada, esses sistemas alteram a relação entre custo e impacto militar, podendo favorecer ações ofensivas de baixo custo e alta eficácia.

Os enxames de drones representam uma das mais promissoras, e desafiadoras, áreas da guerra autônoma. Sua implementação bem-sucedida exige a convergência de avanços em IA, robótica, guerra eletrônica e coordenação tática descentralizada. À medida que mais países desenvolvem essas tecnologias, cresce a urgência de políticas de controle, regulamentação e doutrina operacional que garantam o uso responsável, seguro e eficaz dessas capacidades no cenário internacional.

2.1.4 Situação Nacional e Capacidade Industrial Brasileira

No contexto brasileiro, o desenvolvimento de plataformas com funcionalidades autônomas ainda é incipiente e enfrenta múltiplos desafios estruturais. O Nauru 1000C, fabricado pela empresa XMobots, constitui atualmente uma das principais iniciativas nacionais no campo dos SARP. Com emprego operacional na vigilância tática e missões de sensoriamento remoto, a plataforma apresenta capacidade de navegação automatizada por meio de lógica embarcada, fusão de dados de sensores inerciais e controle por *waypoint*. Apesar disso, ainda não incorpora funções de decisão autônoma complexa ou armamento letal embarcado, o que limita seu emprego em operações de defesa mais avançadas (XMobots, 2023; MARINHA DO BRASIL, 2024).

Nesse contexto, reconhece-se o Nauru 1000C como um marco inicial na busca por maior autonomia nacional em sistemas não tripulados, ao mesmo tempo em que se ressalta a ausência de um plano estruturado de certificação, experimentação e integração dessas plataformas ao ambiente naval (MARINHA DO BRASIL, 2023a). Destaca-se a necessidade de ampliar o escopo do desenvolvimento tecnológico, superando o atual foco em sensores ópticos e controle automatizado, rumo a uma arquitetura de controle cognitivo baseada em IA embarcada e aprendizado adaptativo.

Além do Nauru, foram identificadas iniciativas de menor porte em universidades e centros de pesquisa nacionais, voltadas ao desenvolvimento de subsistemas autônomos, algoritmos de navegação, técnicas de fusão sensorial e soluções de controle embarcado. Conforme indicado nas entrevistas e na análise documental, tais iniciativas frequentemente enfrentam limitações relacionadas à ausência de financiamento estável, à baixa articulação com a Base Industrial de Defesa e à escassez de incentivos voltados à inovação de uso dual.

De forma complementar, o Brasil enfrenta limitações para dominar integralmente a produção de sistemas aéreos remotamente pilotados e de seus componentes críticos, o que condiciona a autonomia tecnológica em plataformas avançadas (BRASIL, 2014; BRASIL, 2018). No âmbito do VANT-FAB, o Ministério da Defesa registrou que a Harpia Sistemas, associação entre Embraer, Avibras e AEL Sistemas, apresentava o sistema VANT Falcão como uma possível solução nacional para missões de reconhecimento. Entretanto, a descontinuidade dessa iniciativa evidenciou dificuldades estruturais relacionadas à consolidação de capacidades tecnológicas autônomas e sustentáveis no país. Esse cenário reflete a persistência de desafios na articulação entre indústria, governo e Forças Armadas, bem como limitações associadas ao acesso a tecnologias sensíveis, frequentemente reguladas por regimes internacionais de

controle, como o *International Traffic in Arms Regulations* (ITAR), que impactam a soberania do ciclo de desenvolvimento.

Outro entrave relevante é a ausência de um marco regulatório e certificador específico para sistemas letais autônomos no Brasil. Como aponta o documento da Marinha (2024), a inexistência de normas técnicas e protocolos de validação funcional inibe a maturação tecnológica, afasta investimentos e compromete a segurança operacional em cenários reais. Isso reforça a importância da criação de um programa nacional de experimentação, alinhado com os princípios do uso responsável da força e com os padrões do Direito Internacional Humanitário.

Do ponto de vista institucional, a Estratégia Nacional de Defesa e a Política Nacional de Defesa apontam a autonomia tecnológica como eixo estruturante das capacidades estratégicas nacionais. Contudo, os documentos ainda carecem de desdobramentos práticos para o campo dos SARP com funções letais autônomas. Iniciativas recentes da Marinha, como o Plano Setorial de Ciência, Tecnologia e Inovação (PCTIMar), apontam para uma reestruturação das prioridades em defesa cibernética, sistemas inteligentes e sensores embarcados, mas sua implementação efetiva ainda depende de maiores recursos e articulação interinstitucional (BRASIL, 2020; MARINHA DO BRASIL, 2024).

O Brasil possui núcleos de excelência científica e capacidades pontuais na produção de plataformas não tripuladas, mas ainda está distante de consolidar uma cadeia integrada e autônoma para o desenvolvimento de SARP com capacidades letais autônomas. A superação dessa lacuna requer investimentos contínuos em pesquisa aplicada, políticas públicas de incentivo à inovação dual-use, integração com a BID e fortalecimento de programas de formação de recursos humanos em áreas críticas como IA, robótica, sensores inteligentes e guerra eletrônica.

2.1.5 Considerações Finais sobre as Tendências Tecnológicas

A análise das tendências tecnológicas nos SARP evidencia um movimento global consistente em direção ao aumento da autonomia, à integração de inteligência artificial embarcada e à diversificação de aplicações, tanto no campo militar quanto no uso dual. O avanço dessas tecnologias, impulsionado por demandas operacionais em conflitos recentes e pela competição geopolítica, tem elevado o patamar de exigência sobre as capacidades de defesa das nações, inclusive do Brasil.

A consolidação de plataformas com alto grau de autonomia, como os sistemas MQ-9B SkyGuardian, Bayraktar Akıncı e loitering munitions autônomas, revela que a direção

predominante é a de sistemas multifuncionais com capacidade de vigilância persistente, tomada de decisão assistida por IA e emprego de força com tempo de reação reduzido. Essa transformação está intimamente ligada à maturação de tecnologias como redes neurais convolucionais, sensores hiperspectrais, processamento embarcado em edge computing e enlaces criptografados de alta resiliência (Taddeo & Blanchard, 2022; CICV, 2021).

Além disso, as lições extraídas dos teatros de guerra contemporâneos indicam a consolidação de duas tendências complementares: a saturação do espaço aéreo com plataformas de baixo custo e a valorização de sistemas interoperáveis, capazes de operar em rede com outras unidades, tripuladas ou não. O emprego de drones comerciais adaptados em larga escala na Ucrânia e o sucesso tático de plataformas turcas no Cáucaso reforçam a relevância de uma abordagem modular, ágil e descentralizada da força aérea não tripulada (CSIS, 2020; NSIN, 2022).

Nesse contexto, os enxames de drones representam uma evolução qualitativa, traduzindo a inteligência coletiva em poder de dissuasão. O controle distribuído e a coordenação autônoma entre unidades tornam esses sistemas altamente resilientes e adequados a missões de saturação, supressão de defesas aéreas e coleta de inteligência em ambientes hostis. Tais atributos pressionam por um novo tipo de doutrina, mais flexível e baseada em princípios de rede, como já reconhecido em iniciativas da DARPA e em projetos em andamento em países como China e Israel (Kallenborn, 2022; DARPA, 2021a).

No Brasil, as iniciativas como o Nauru 1000C e a retomada de estudos doutrinários na MB e no Exército indicam um reconhecimento gradual da importância dessas tecnologias. No entanto, a lacuna entre as aspirações estratégicas e as capacidades efetivamente disponíveis ainda é significativa. O desafio nacional, contudo, não se limita ao desenvolvimento de plataformas, mas envolve a articulação entre pesquisa, testes operacionais, processos de certificação, integração com sistemas de combate e formação continuada de recursos humanos (MARINHA DO BRASIL, 2023a).

Outro ponto crítico diz respeito à vulnerabilidade cibernética e à necessidade de proteger os sistemas contra-ataques de guerra eletrônica, *spoofing* e interferência em enlaces. A resiliência cibernética passa a ser um pré-requisito para a operação autônoma em ambientes contestados, exigindo sinergia entre as áreas de segurança da informação, engenharia de sistemas e doutrina operacional.

Observa-se que a autonomia nos sistemas de armas não pode ser analisada isoladamente, mas como parte de um ecossistema de defesa mais amplo. A decisão de adotar, adaptar ou desenvolver SARP com capacidade letal autônoma envolve aspectos tecnológicos, mas também

institucionais, estratégicos e ético-normativos. Como apontado por Boulanin e Verbruggen (2017), a governança dessa tecnologia é tão relevante quanto sua viabilidade técnica, especialmente em contextos em que a delegação do uso da força a sistemas não humanos pode redefinir os limites do controle estatal.

A tendência é que a adoção de tecnologias autônomas letais se intensifique nos próximos anos, exigindo do Brasil não apenas atualização tecnológica, mas também uma estratégia de longo prazo que combine soberania, segurança jurídica e adaptação doutrinária. A integração de capacidades autônomas aos SARP deve, portanto, ser pensada como um vetor estruturante da defesa nacional, com impactos sobre a indústria, a formação de pessoal, a interoperabilidade com aliados e a posição brasileira nos foros internacionais sobre armas autônomas.

O Quadro 6 apresenta uma síntese comparativa de sistemas letais de SARP atualmente empregados por potências militares. São destacados parâmetros como autonomia de voo, alcance, carga útil, presença de inteligência artificial embarcada e capacidade ofensiva. A análise comparativa oferece uma referência técnica útil para avaliar os limites e possibilidades do cenário nacional frente às plataformas consolidadas internacionalmente.

Quadro 6 - Comparativo entre SARP letais de referência internacional

Plataforma	País	Autonomia (h)	Alcance (km)	Carga útil (kg)	Capacidade Letal	IA Embarcada?
MQ-9 Reaper	EUA	27	1.900	1.700	Sim	Sim
Bayraktar Akıncı	Turquia	24+	1.500+	1.350	Sim	Parcial
Wing Loong II	China	20	4.000	400	Sim	Sim
IAI Harop	Israel	9	1.000	N/A (suicida)	Sim	Parcial

Fonte: Dados técnicos dos fabricantes: GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS (EUA), Baykar (Turquia), AVIC (China), Israel Aerospace Industries - IAI (Israel); adaptado pelo autor.

2.2 Sensores e Tecnologias Embarcadas

O desempenho de um SAAL embarcado em um SARP depende diretamente da sofisticação e integração dos sensores e demais tecnologias embarcadas que compõem sua arquitetura. Esses subsistemas são responsáveis por viabilizar a percepção situacional, a fusão e análise de dados, a navegação precisa, a detecção e classificação de alvos, bem como a

execução de ações autônomas de combate. A eficácia da missão, em cenários de conflito dinâmico e contestado, está profundamente condicionada à maturidade desses componentes tecnológicos.

Em primeiro plano, destacam-se os sensores eletro-ópticos e infravermelhos (EO/IR), essenciais para vigilância persistente, reconhecimento, aquisição e designação de alvos. Montados geralmente em torres giroestabilizadas (gimbals), esses sensores oferecem imagens de alta resolução em espectros visível e térmico, operando de forma eficaz tanto em condições diurnas quanto noturnas. O sistema MX-15, por exemplo, utilizado no Bayraktar TB2, combina câmeras visíveis, infravermelhas, telêmetro a laser e apontadores designadores em uma única unidade, oferecendo suporte à segmentação autônoma de alvos (Baykar Defense, 2023). Essa combinação permite que o sistema identifique, rastreie e, em certas condições, classifique automaticamente objetos de interesse, utilizando algoritmos embarcados de visão computacional.

Para garantir a precisão do posicionamento e da navegação autônoma, os SARP empregam sistemas GNSS, frequentemente integrados a sistemas de navegação inercial (INS-*Inertial Navigation Systems*). A complementaridade entre esses sistemas permite a continuidade da navegação mesmo em situações de degradação ou perda do sinal GNSS, como em cenários de interferência, bloqueio ou negação de serviço (Groves, 2013).

O MQ-9B SkyGuardian, por exemplo, integra navegação baseada em dados inerciais, GNSS, além de radar de abertura sintética (SAR), permitindo mapeamento em tempo real mesmo sob condições meteorológicas adversas (General Atomics Aeronautical Systems, 2025a). Esse tipo de radar, combinado com funções de GMTI (*Ground Moving Target Indicator*), confere à aeronave a capacidade de detectar, rastrear e priorizar alvos móveis em tempo real, inclusive sobre áreas marítimas amplas e pouco povoadas.

A aplicação de sensores LIDAR, embora mais comum em plataformas civis e experimentais, tem avançado para usos militares específicos. Esses sensores são capazes de gerar modelos 3D precisos do terreno, sendo particularmente úteis em operações de pouso autônomo, navegação em áreas urbanas ou reconhecimento de alvos camuflados. No entanto, seu uso contínuo ainda é limitado por fatores como consumo energético elevado e sensibilidade a condições climáticas adversas (Shan; Toth, 2018).

Outro pilar essencial da arquitetura embarcada são os sistemas de guerra eletrônica e de inteligência de sinais, como SIGINT (*Signals Intelligence*), ELINT (*Electronic Intelligence*) e COMINT (*Communications Intelligence*). Esses recursos permitem detectar, localizar e analisar emissões eletromagnéticas, ampliando a consciência situacional da plataforma e apoiando ações

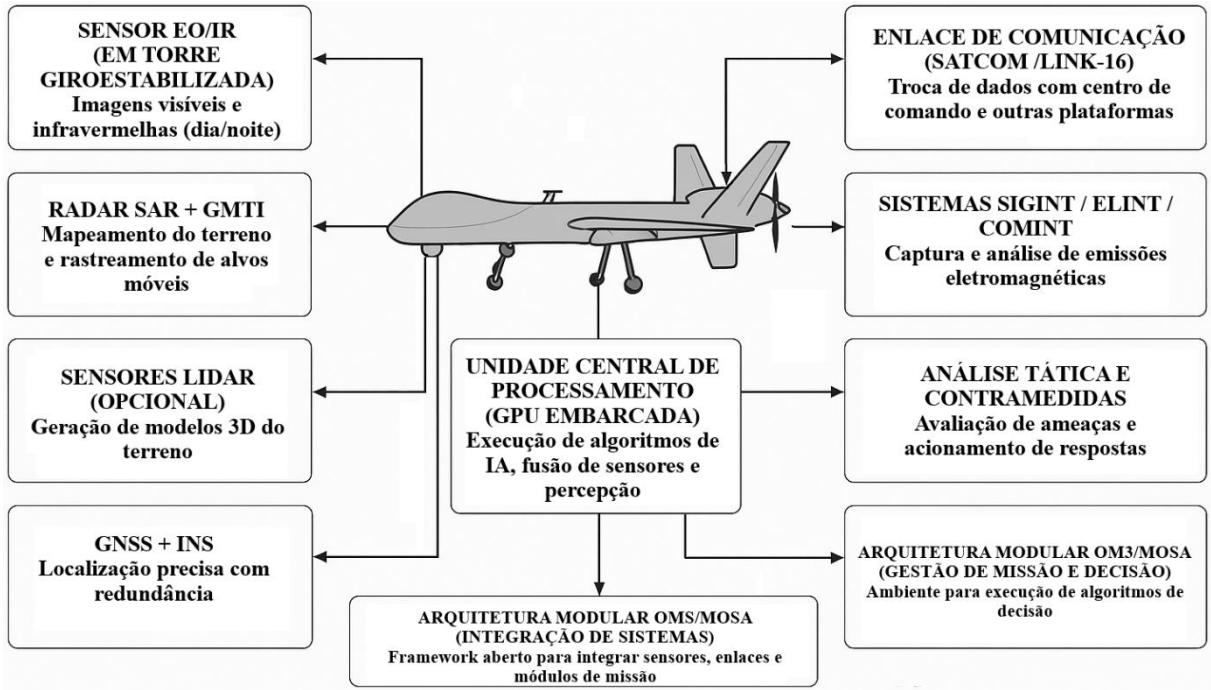
de interferência, degradação e disrupção em ambientes eletromagneticamente contestados, nos quais sensores, comunicações e sistemas de navegação podem ser explorados ou negados pelo adversário (UNITED STATES, s.d.).

No âmbito da Marinha, sensores de guerra eletrônica e de inteligência de sinais são considerados prioritários para ampliar a autonomia operacional de plataformas navais e aéreas não tripuladas em missões de inteligência, vigilância e reconhecimento (MARINHA DO BRASIL, 2023b).

Em paralelo, o desempenho de um SAAL depende do nível de integração de dados fornecidos pelos diversos sensores embarcados. Tecnologias de IA, especialmente aprendizado de máquina e redes neurais profundas, têm sido aplicadas à fusão multissensorial em tempo real. Isso permite não apenas cruzar dados de diferentes fontes, visuais, térmicos, radar, acústicos, mas também tomar decisões baseadas em padrões dinâmicos, aumentando a capacidade da plataforma de operar de forma autônoma e adaptativa frente a ameaças imprevisíveis (Goodfellow *et al.*, 2016).

A diversidade de sensores e subsistemas embarcados, bem como a necessidade de sua integração em arquiteturas modulares, pode ser sintetizada no diagrama a seguir. A Figura 10 ilustra a disposição típica de sensores e tecnologias em um SARP com funções autônomas, destacando como esses elementos se interconectam para formar um ecossistema operacional capaz de viabilizar missões de inteligência, vigilância e combate em ambientes contestados.

Figura 10 - Integração de Sensores em um SARP com funções autônomas



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Baykar Defense (2023); General Atomic's Aeronautical Systems (2025b); UNITED STATES (2020).

Complementarmente, a sistematização dos sensores e tecnologias empregados nessas plataformas podem ser visualizada no Quadro 7, que descreve as principais categorias de equipamentos embarcados, suas funcionalidades e implicações para a autonomia operacional. Essa síntese permite identificar quais componentes são indispensáveis para diferentes níveis de autonomia e quais permanecem em fase experimental ou sujeitos a restrições tecnológicas.

Quadro 7 - Sensores e Tecnologias Embarcadas em SARP com Funções Autônomas

Sensor/Sistema	Descrição	Referência
Sensor EO/IR (em torre giroestabilizada)	Imagens visíveis e térmicas de alta resolução, dia/noite; montado em gimbals; pode incluir telêmetro a laser e apontadores; permite segmentação autônoma de alvos.	L3HARRIS TECHNOLOGIES, 2021
Radar SAR + GMTI	Radar de abertura sintética permite mapeamento em tempo real; funções GMTI detectam e rastreiam alvos móveis, inclusive sobre áreas marítimas amplas.	GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, INC., 2023.
Sensores LIDAR (opcional)	Geração de modelos 3D do terreno; úteis em pousos autônomos e detecção de alvos camuflados; uso limitado por alto consumo energético e sensibilidade climática.	ZOU, C.; SUN, Y.; KONG, L., 2024.

Sensor/Sistema	Descrição	Referência
GNSS + INS	Sistemas de navegação autônoma com redundância; mantêm precisão mesmo sob interferência GPS (<i>jamming/spoofing</i>).	GROVES, 2013
Sistemas SIGINT / ELINT / COMINT	Detectam e analisam emissões eletromagnéticas; permitem evasão, interferência ou neutralização de ameaças; essenciais na guerra eletrônica.	ELBIT SYSTEMS, s. d.
Unidade Central de Processamento (GPU embarcada)	Executa algoritmos de IA, visão computacional, fusão de sensores e controle autônomo; miniaturizadas e energeticamente eficientes.	NVIDIA CORPORATION, 2025
Análise Tática e Contramedidas	Processa informações para avaliar ameaças, recomendar manobras evasivas e acionar contramedidas eletrônicas.	Yu <i>et all</i> , 2025
Enlaces de Comunicação (SATCOM, Link-16)	Comunicação criptografada com centros de comando e outras plataformas; possibilita operações em rede; sujeita a restrições internacionais de exportação.	HENSOLDT, s.d.
Arquitetura Modular OMS/MOSA (Integração de Sistemas)	Framework de integração aberta para sensores, enlaces e módulos de missão; favorece interoperabilidade, manutenção e modernização incremental.	UNITED STATES. DoD – OUSD(R&E). <i>Implementing a Modular Open Systems Approach (MOSA)</i> . 2025a.
Arquitetura Modular OMS/MOSA (Gestão de Missão e Decisão)	Ambiente voltado à execução de algoritmos de decisão e gestão da missão; assegura escalabilidade e independência tecnológica.	UNITED STATES. DoD – OUSD(R&E). <i>Implementing a Modular Open Systems Approach (MOSA)</i> . 2025b.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em documentação técnica de fabricantes, normas militares e literatura científica especializada.

A análise da figura e do quadro evidencia que a autonomia plena não decorre de um único sensor ou subsistema isolado, mas sim da integração sinérgica entre sensores de percepção, unidades de processamento, enlaces de comunicação e padrões de arquitetura modular. Essa perspectiva é essencial para compreender como a evolução tecnológica pode ser traduzida em capacidade operacional concreta, tanto no contexto internacional quanto nas necessidades específicas da MB.

Cumprе ressaltar que a análise apresentada no Quadro 7 privilegia a dimensão funcional e tecnológica dos sensores embarcados, não contemplando, de forma exaustiva, as cadeias globais de valor associadas à produção, integração e certificação desses subsistemas. Na prática, a disponibilidade e a autonomia de emprego dessas tecnologias são condicionadas por estruturas industriais altamente concentradas, por regimes de controle de exportação e por assimetrias no domínio de componentes críticos, aspectos que impõem restrições adicionais à autonomia tecnológica nacional e são retomados no Capítulo 3.

Para garantir a interoperabilidade e a atualização contínua das missões, os SARP empregam tecnologias de comunicação criptografadas, incluindo enlaces via satélite

(SATCOM) e rádios UHF/VHF. Sistemas como o Link-16 ou padrões equivalentes asseguram não apenas o intercâmbio seguro de dados com centros de comando, mas também a coordenação com outras plataformas tripuladas ou não tripuladas, conferindo capacidade de operar em rede (North Atlantic Treaty Organization, s.d.). No entanto, o acesso a esses sistemas ainda é limitado por restrições de exportação e regulamentações internacionais como o ITAR, o que impacta diretamente países em desenvolvimento.

As plataformas computacionais embarcadas também têm evoluído rapidamente. Unidades de processamento gráfico de alto desempenho, como as da linha NVIDIA, tem sido integradas a UAVs de médio porte, viabilizando o processamento embarcado de algoritmos de IA, análise de imagem e rastreamento em tempo real. A literatura recente também destaca que o avanço do *edge computing* tem ampliado a capacidade de executar tarefas complexas de IA diretamente a bordo, embora peso, consumo de energia e restrições de hardware ainda permaneçam como fatores limitantes para plataformas menores (Koubaa *et al.*, 2023; Tijtgaat *et al.*, 2017).

A integração bem-sucedida de todos esses elementos depende de uma arquitetura modular, aberta e escalável. Modelos baseados nos padrões *Open Mission Systems* (OMS)²² e *Modular Open Systems Approach* (MOSA)²³ são cada vez mais adotados para garantir a flexibilidade na modernização tecnológica e na adaptação a diferentes tipos de missão (UNITED STATES, 2020). A adoção de padrões interoperáveis, com ciclo de vida prolongado e passíveis de atualização incremental sem dependência excessiva de fornecedores externos, também é apontada como diretriz relevante (MARINHA DO BRASIL, 2023b).

Sensores e tecnologias embarcadas não são apenas periféricos, mas constituem o núcleo funcional dos SARP com funções autônomas letais. A maturidade e a interoperabilidade desses componentes definem não só o desempenho tático das plataformas, mas também a capacidade estratégica de defesa de uma nação. Para o Brasil, o domínio desses elementos representa um passo decisivo rumo à soberania tecnológica no campo dos sistemas autônomos de combate.

²² Open Mission Systems é o padrão criado inicialmente pela Força Aérea dos EUA para permitir que sensores, armas e outros sistemas possam ser rapidamente integrados a plataformas aéreas por meio de interfaces abertas e padronizadas (UNITED STATES, 2025b).

²³ Modular Open Systems Approach é uma estratégia do departamento de defesa dos EUA que promove o desenvolvimento de sistemas modulares baseados em padrões abertos, facilitando atualizações tecnológicas, substituição de componentes e redução de custos ao longo do ciclo de vida dos sistemas militares (UNITED STATES, 2025a).

2.3 Cadeia Industrial Global e Fragmentação Tecnológica

A estrutura contemporânea da cadeia industrial global em sistemas de defesa e tecnologias autônomas caracteriza-se por uma alta interdependência produtiva. Em vez de processos lineares nacionais, observa-se uma rede global de fornecedores especializados, na qual diferentes etapas, pesquisa, projeto, fabricação de semicondutores, integração de sensores e montagem final, estão distribuídas entre países de distintas capacidades tecnológicas. Esse modelo segue a lógica das *Global Value Chains* (GVC), descrita pela OECD (2025), em que cada elo da cadeia agrega valor de acordo com seu nível de especialização, mas amplia vulnerabilidades diante de choques externos ou restrições comerciais.

Conforme a OECD (2025), a fragmentação internacional da produção reduziu custos e acelerou a inovação, mas também expôs os países dependentes a riscos de interrupção logística e a flutuações geopolíticas. As disrupções observadas desde a pandemia e as sanções tecnológicas entre grandes potências evidenciaram a fragilidade das cadeias de semicondutores e sensores críticos.

No campo da defesa, essa concentração é particularmente visível. O *Stockholm International Peace Research Institute* (SIPRI, 2025) mostra que os cinco maiores exportadores, Estados Unidos, França, Rússia, China e Alemanha, continuam responsáveis pela maior parte das exportações globais de armamentos no período 2020–2024, e registra que os Estados Unidos responderam por cerca de 43 % das exportações globais nesse intervalo. Esse domínio assegura vantagem industrial e controle sobre fluxos tecnológicos e cadeias de suprimento associadas, evidenciando a dependência de países importadores em relação a um grupo restrito de fornecedores.

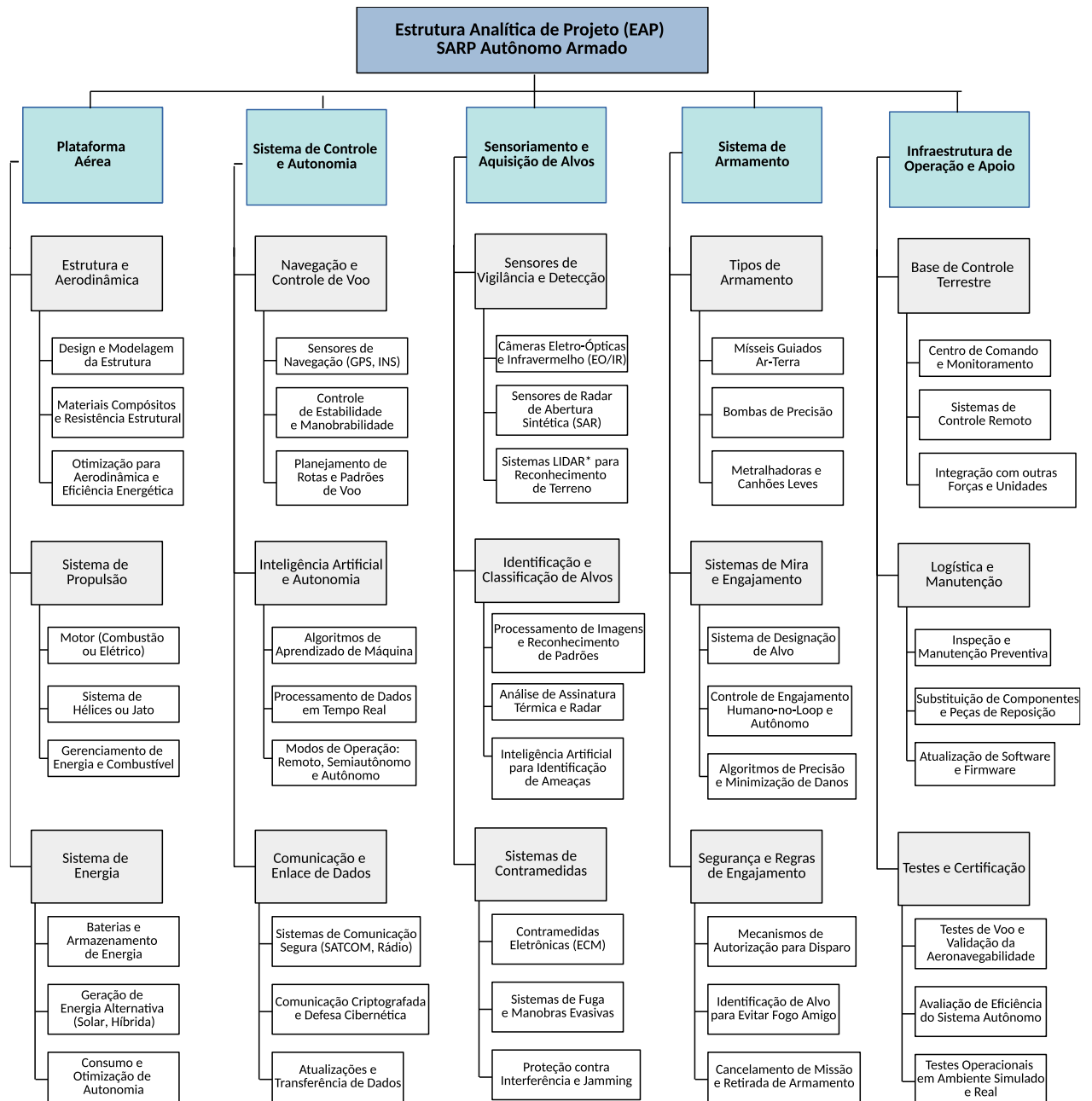
Paralelamente, regimes de controle de exportações reforçam essas assimetrias. O *International Traffic in Arms Regulations* (UNITED STATES, 2024a) e as *Export Administration Regulations* (UNITED STATES, 2024b), mantidos pelo governo norte-americano, impõem licenciamento rigoroso para tecnologias sensíveis. De modo complementar, o Wassenaar Arrangement (2024) define e atualiza listas de bens e tecnologias de duplo uso (*dual-use goods and technologies*), que abrangem sensores, softwares embarcados e sistemas de comunicação. Esses mecanismos, embora voltados à segurança internacional, funcionam como barreiras tecnológicas que limitam o acesso de países fora dos blocos produtores.

Essas dinâmicas globais refletem-se diretamente na configuração dos sistemas de armas autônomos, cuja complexidade técnica reproduz a fragmentação e a interdependência

observadas nas cadeias industriais internacionais. A arquitetura de um SARP com capacidades letais autônomas depende da integração complexa de diversos subsistemas especializados, que vão desde sensores e atuadores até módulos de inteligência artificial embarcada, enlaces de comunicação, algoritmos de navegação e sistemas de controle de engajamento.

Tal interdependência torna a cadeia produtiva desses sistemas altamente fragmentada e intensamente internacionalizada, envolvendo empresas de múltiplos setores, aeroespacial, tecnologia da informação, defesa, semicondutores e computação em nuvem. A decomposição funcional de um SARP armado autônomo pode ser visualizada a partir da Estrutura Analítica de Projeto (EAP) apresentada na Figura 11, em que cada macroárea tecnológica representa um domínio distinto de conhecimento, com requisitos próprios de desenvolvimento, integração e validação.

Figura 11 - Estrutura Analítica de Projeto (EAP) de Drone Aéreo Autônomo Armado



* LIDAR - Light Detection and Ranging" (Detecção e Alcance de Luz), em português. É uma tecnologia de sensoriamento remoto que usa feixes de laser para medir distâncias e movimentos com precisão, em tempo real.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em UNITED STATES (2018), NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (2025), PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE 2019) e ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (2019)

A Estrutura Analítica do Projeto (EAP) foi construída segundo os princípios clássicos de decomposição hierárquica de sistemas complexos, conforme diretrizes consolidadas em manuais de engenharia de sistemas e gestão de projetos, como o NASA Work Breakdown Structure Handbook. A organização adotada reflete o caráter de sistema de sistemas do SARP autônomo armado, cuja concepção mobiliza um amplo conjunto de áreas do conhecimento.

Cada módulo da EAP traduz não apenas um componente técnico, mas também um campo de especialização que demanda equipes próprias, evidenciando o caráter multidisciplinar e interinstitucional do desenvolvimento de um SARP autônomo armado.

Na plataforma aérea, concentram-se os esforços de engenheiros aeronáuticos, de materiais e eletricitas, responsáveis por aerodinâmica, integração estrutural, propulsão e gerenciamento energético. A camada de sensores e sistemas de missão exige a contribuição de especialistas em telecomunicações, radares, óptica, guerra eletrônica e ciência da computação, dedicados à fusão de dados e ao desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial capazes de operar em tempo real. Já a dimensão armamento e integração de sistemas letais demanda engenheiros de armamento, analistas de segurança e especialistas em comando e controle, garantindo interoperabilidade e confiabilidade.

O software embarcado, por sua vez, envolve profissionais especializados em arquiteturas de tempo real, cibersegurança e sistemas críticos, em conformidade com padrões internacionais de modularidade e interoperabilidade, como o MOSA (UNITED STATES, 2025a) e o VITA (VMEbus International Trade Association, 2017). Em paralelo, aspectos regulatórios e doutrinários requerem insumos de juristas e especialistas em relações internacionais, assegurando aderência às normas internacionais de conduta, mesmo que tais dimensões extrapolem o foco técnico deste estudo.

A gestão de projeto integra ainda administradores, especialistas em logística e engenheiros de produção, responsáveis por coordenar cronogramas, certificações e cadeias de suprimento, em estreita articulação com a Base Industrial de Defesa, universidades e órgãos governamentais.

Esse arranjo demonstra que o desenvolvimento de um SARP autônomo armado não é tarefa de um núcleo restrito, mas depende de centenas de profissionais de diferentes áreas, organizados em torno da tríplice hélice. A EAP, nesse sentido, não apenas estrutura etapas de trabalho, mas também torna visível a complexidade sistêmica e a densidade institucional necessárias para transformar uma ideia em capacidade operacional.

Tal exigência multidisciplinar já se verifica em programas internacionais de referência. O MQ-9 Reaper, nos Estados Unidos, envolveu a colaboração de centenas de engenheiros de diferentes especialidades, coordenados pela General Atomics em estreita relação com o Departamento de Defesa (General Atomics Aeronautical Systems, 2025b). No Brasil, o Nauru 1000C, desenvolvido pela XMobots, contou com parcerias entre empresa, universidades e Forças Armadas para viabilizar cargas úteis modulares e enlaces de comunicação, ilustrando

que mesmo em projetos de menor escala a integração de setores distintos é condição indispensável (XMobots, 2023).

De acordo com o relatório da PAX (2020), tecnologias críticas para o funcionamento de SARP autônomos armados não são exclusivas de fabricantes tradicionais de armamentos. Ao contrário, muitas delas têm origem em empresas civis, universidades e startups do setor de inteligência artificial e análise de dados. Entre os principais atores tecnológicos mapeados estão empresas como Amazon, Microsoft, Palantir, Clarifai e IBM, que oferecem desde soluções de processamento distribuído até algoritmos de reconhecimento facial e visão computacional aplicáveis ao contexto militar.

O Quadro 8 apresenta uma amostra de empresas e suas respectivas especializações tecnológicas, classificadas de acordo com os blocos funcionais da EAP.

Quadro 8 - Empresas, Países de Origem e Especializações Tecnológicas

Macroárea Tecnológica	Empresa (País)	Especialização Tecnológica
Sensoriamento e EO/IR	FLIR (EUA), IAI (Israel), Elbit (Israel)	Câmeras térmicas, SAR, vigilância
Reconhecimento e Visão Computacional	Clarifai (EUA), Yitu (China), SenseTime (China)	Reconhecimento facial, aprendizado profundo
IA embarcada e fusão de dados	SparkCognition (EUA), Neurala (EUA), STM (Turquia)	Machine learning, seleção autônoma de alvos
Navegação e Controle	Dibotics (França), General Atomics (EUA)	INS/GPS, IA de navegação, planejamento autônomo
Sistemas de Enxame e Coordenação	Corenova (EUA), Kratos (EUA), DARPA (EUA)	OFFSET, Valkyrie, swarm intelligence
Armamento e Engajamento	Rafael (Israel), Elbit (Israel), Raytheon (EUA)	SkyStriker, Hero, Patriot, Brimstone
Comunicação e Enlace de Dados	Microsoft, Amazon, Palantir (EUA)	Cloud, enlace seguro, SATCOM, defesa cibernética

Fonte: PAX, 2019a

A análise da PAX (2019a) destaca que a autonomia operacional desses sistemas depende do grau de integração e confiabilidade entre os componentes, sendo que muitos deles apresentam riscos relacionados à governança algorítmica e à ausência de padrões globais de certificação.

Plataformas como o SkyStriker, da Elbit Systems, e o sistema Agile Condor, embarcado em drones MQ-9 Reaper da General Atomics, já são capazes de realizar detecção e engajamento de alvos com baixa supervisão humana. O Agile Condor, por exemplo, emprega módulos de IA capazes de identificar padrões, rastrear ameaças e executar funções críticas em voo (PAX, 2019b). Esse grau de automação exige altos níveis de coordenação entre sensores, sistemas de

missão e algoritmos decisórios, demandando novas estruturas de validação e testes, muitas vezes ainda inexistentes.

Segundo a PAX (2019b), entre cinquenta empresas analisadas no setor, apenas quatro adotam diretrizes claras de manutenção de controle humano significativo. Outras trinta foram classificadas como de “alta preocupação” por não apresentarem salvaguardas éticas, o que inclui empresas líderes como Lockheed Martin, STM, AVIC e IAI. Esse cenário revela a urgência de uma governança internacional mais robusta, com protocolos para transparência algorítmica e certificação de sistemas autônomos letais.

Essa fragmentação da cadeia industrial também representa um obstáculo à soberania tecnológica dos países em desenvolvimento, que dependem da importação de subsistemas sensíveis sob rígidos regimes de controle de exportação, como o ITAR. Nesse contexto, torna-se crucial investir em capacidade nacional de desenvolvimento de sensores, algoritmos e plataformas embarcadas, bem como em políticas de fomento à BID.

Ressalta-se que a eventual adoção de SARP com funções letais autônomas somente será viável mediante a articulação consistente entre centros de pesquisa, indústria e governo, de modo a viabilizar a nacionalização progressiva de subsistemas críticos (MARINHA DO BRASIL, 2023b). A soberania operacional, nesse sentido, depende não apenas do domínio tecnológico, mas da construção de uma cadeia produtiva que garanta segurança, confiabilidade e adaptabilidade às necessidades estratégicas do país.

2.4 Energia e Autonomia

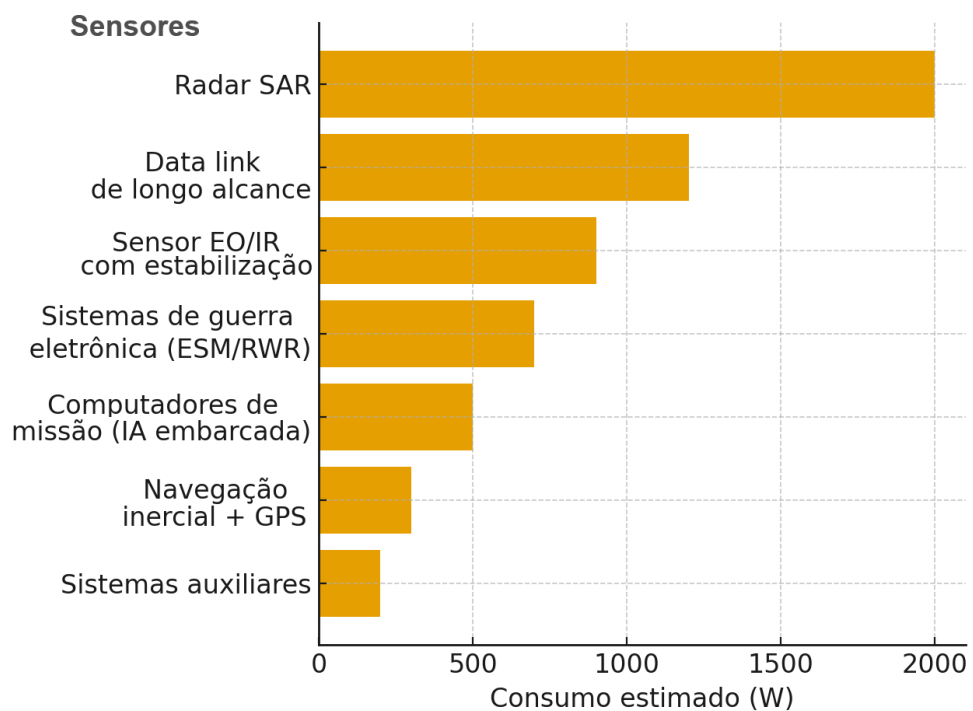
O desempenho de plataformas aéreas armadas com funções autônomas depende diretamente de sua autonomia energética, aspecto que determina não apenas o tempo de permanência em voo, mas a capacidade de operar sensores, enlaces de dados e sistemas embarcados de forma sustentada. Em sistemas armados com funções letais autônomas, a energia torna-se o insumo crítico que viabiliza ou limita a autonomia operacional plena.

As principais plataformas atualmente em operação utilizam sistemas de propulsão variados, com predomínio de motores a combustão (turboélice ou pistão) em drones médios e grandes. O MQ-9 Reaper, por exemplo, possui autonomia de até 27 horas e alcance de 1.850 km, com velocidade de cruzeiro de 313 km/h (General Atomics Aeronautical Systems, 2025b). Já o Bayraktar TB2, mais compacto e eficiente, mantém autonomia de 27 horas com velocidade média de 130 km/h (BAYKAR DEFENSE, 2023). O CH-5, da China, com propulsão diesel-elétrica, pode chegar a 30 horas de voo (CASC, 2022).

A demanda energética de um SARP armado vai além da propulsão: sistemas como radares de abertura sintética (SAR), câmeras EO/IR de alta resolução, LIDAR, enlaces criptografados via SATCOM e IA embarcada para tomada de decisão consomem potência de forma contínua e crescente. Com carga completa de sensores e subsistemas ativos, a autonomia pode reduzir-se significativamente, conforme observado nos estudos Balestrieri *et al.* (2021) e Wu *et al.* (2022). Essa redução decorre, em grande parte, do alto consumo energético de sensores avançados e módulos embarcados.

A Figura 12 apresenta uma estimativa comparativa do consumo médio por tipo de sensor ou sistema, evidenciando a pressão energética imposta por componentes como radares SAR, enlaces de comunicação tática e sistemas de guerra eletrônica. São valores estimados médios, baseados em literatura aberta e dados técnicos disponíveis, podendo variar conforme fabricante e configuração.

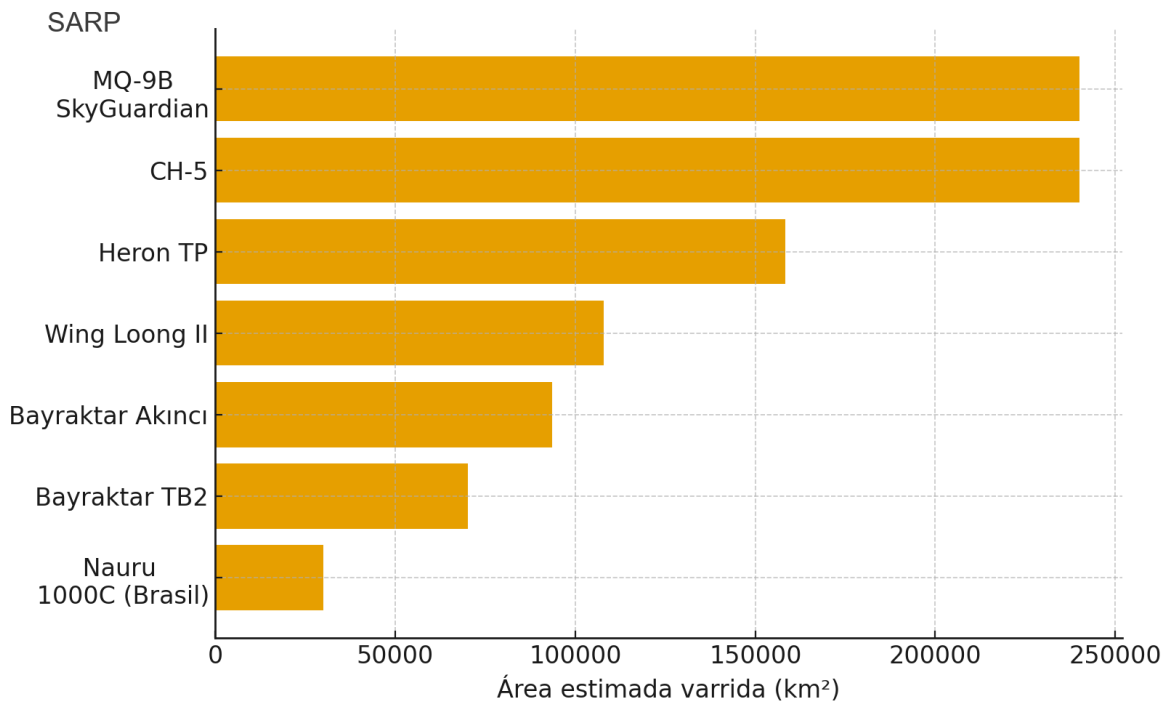
Figura 12 - Estimativa comparativa de consumo energético



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados de General Atomics (MQ-9), Baykar (Akinci), CSIS (2023) e UNIDIR (2023).

Considerando essas limitações, a Figura 13 apresenta uma estimativa da área potencialmente coberta por diferentes drones armados, com base em uma faixa sensorial de 20 km e voo contínuo durante sua autonomia máxima:

Figura 13 - Estimativa de área varrida por drones armados com 20 km de faixa sensorial



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados técnicos dos fabricantes (2023).

Esses valores representam cenários ideais de varredura linear contínua, sem considerar limitações como:

- Necessidade de retorno ao ponto de origem;
- Manobras evasivas e variações de altitude;
- Sobreposição de rotas para garantir cobertura contínua;
- Fatores meteorológicos ou de interferência eletromagnética.

Se considerarmos uma perda operacional de 20 a 30% da área total, valor comum em simulações realistas, a capacidade útil de cobertura de um drone como o Akinci (24 h de

autonomia, 195 km/h) cai de cerca de 93.600 km² para 65.000–75.000 km², o que ainda o torna viável para patrulhas setoriais na Amazônia Azul.

Além disso, o uso de tecnologias emergentes como painéis solares, baterias de grafeno e células de combustível pode, futuramente, ampliar a autonomia sem comprometer a carga útil. No entanto, essas tecnologias ainda não são amplamente aplicadas a plataformas armadas devido às exigências de robustez, compatibilidade térmica e interferência eletromagnética.

A comparação com drones civis evidencia diferenças técnicas marcantes: por exemplo, modelos comerciais como o DJI Matrice 300 RTK alcançam autonomia próxima a 1 hora sob condições controladas, operam tipicamente em áreas conhecidas com apoio logístico disponível. Em contraste, plataformas militares necessitam de autonomia prolongada, sensores ativos contínuos e capacidade para operar em contexto adverso, com menos dependência de infraestrutura externa (DJI, 2023; Chaturvedi *et al.*, 2019).

A autonomia energética constitui um limitador crítico para a permanência em voo e, portanto, para a capacidade de vigilância persistente de SARP, sobretudo quando se considera o aumento de consumo e de massa associado a cargas úteis, comunicações e processamento embarcado.

Revisões técnicas sobre propulsão elétrica e sistemas híbridos em UAVs destacam que a autonomia de voo permanece limitada pela capacidade de armazenamento de energia a bordo e pela baixa densidade energética das baterias atualmente disponíveis, impondo compromissos diretos entre tempo de voo, desempenho e capacidade de carga (Ismail *et al.*, 2025).

No caso de missões marítimas de longa duração, esse condicionante tende a se tornar ainda mais sensível, porque a sustentação da presença aérea depende diretamente do tempo de permanência na área e da margem logística disponível, o que reforça a energia como capacidade estruturante, e não apenas como suporte.

2.5 Considerações finais do Capítulo 2

O Capítulo 2 abordou os principais aspectos relacionados à integração tecnológica e à capacitação industrial necessárias para o desenvolvimento de SARP com capacidades autônomas letais. Analisando os sensores, tecnologias embarcadas e os desafios energéticos, foi possível identificar que, embora o Brasil tenha algumas capacidades emergentes em autonomia operacional, ainda enfrenta grandes desafios na construção de uma base industrial robusta para o desenvolvimento de tecnologias críticas, como sensores de alta precisão, inteligência embarcada e sistemas de navegação autônoma.

A fragmentação tecnológica da cadeia produtiva global de SARP armados foi um ponto destacado, com a dependência de fornecedores externos sendo uma barreira significativa para garantir soberania tecnológica. A integração de tecnologias civis e militares, por meio de parcerias internacionais, é uma estratégia necessária para suprir essas lacunas, mas também traz o risco de restrições geopolíticas e limitações em termos de controle e exportação de tecnologias sensíveis.

O tema da autonomia energética se mostrou um dos principais limitadores para a efetividade das plataformas autônomas, já que a carga energética necessária para manter os sistemas operando por longos períodos ainda não é totalmente viável em plataformas militares de alta capacidade. A evolução das tecnologias emergentes, como painéis solares, baterias de grafeno e células de combustível, pode representar uma solução futura, mas sua adoção plena ainda enfrenta obstáculos significativos relacionados à eficiência energética e à robustez das plataformas.

Os SARP armados com capacidades autônomas apresentam grande potencial para revolucionar as operações militares, mas o desenvolvimento completo e independente dessas plataformas no Brasil exigirá uma estratégia nacional integrada que contemple o fortalecimento da BID, a cooperação internacional para acesso a tecnologias avançadas e a capacitação estratégica de recursos humanos.

3 CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO TECNOLÓGICA

Antes de examinar possibilidades de adaptação tecnológica, é necessário esclarecer que a análise aqui desenvolvida não parte do pressuposto de que novos sistemas devam anteceder ou determinar a formulação doutrinária. No campo militar, reconhece-se que é a doutrina que orienta a definição de capacidades e, por consequência, a seleção ou o desenvolvimento dos meios. No caso brasileiro, a doutrina atualmente vigente não contempla de forma explícita o emprego de Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas com funções letais autônomas, o que não configura uma lacuna normativa deliberada, mas reflete a inexistência, até o momento, de capacidades consolidadas dessa natureza.

Nesse sentido, este subcapítulo não propõe a criação de uma nova doutrina nem sugere a inversão da lógica tradicional de planejamento militar. Seu objetivo é analisar de que maneira referências internacionais e modelos existentes podem informar, de forma prospectiva, caminhos de adaptação tecnológica compatíveis com as capacidades nacionais atuais. Eventuais implicações doutrinárias são tratadas como consequências potenciais da evolução dessas capacidades, e não como premissas para sua adoção.

O avanço das tecnologias autônomas no domínio militar aéreo não se limita à aquisição de plataformas remotamente pilotadas de última geração. Requer, sobretudo, a capacidade de integrar, adaptar e operar sistemas complexos de forma soberana, segura e interoperável, considerando tanto os imperativos operacionais quanto os condicionantes geopolíticos e institucionais.

No caso brasileiro, os desafios de integração tecnológica de sistemas de armas autônomas letais em SARP se multiplicam diante de uma base industrial ainda fragmentada, de um arcabouço normativo incipiente, e da dependência de componentes críticos sujeitos a cerceamento tecnológico internacional (Moreira, 2013). Soma-se a isso a insuficiente articulação entre as capacidades técnico-científicas da academia, as demandas das FA e as possibilidades reais da BID.

Este capítulo propõe-se a analisar os principais condicionantes estratégicos, técnicos e institucionais que impactam a integração de tecnologias autônomas letais em SARP no contexto da MB. O enfoque recai sobre a viabilidade prática da adoção nacional de tais sistemas, com ênfase nas barreiras estruturais, nas alternativas de adaptação e nos caminhos possíveis para superar a dependência externa.

A abordagem não é técnica no sentido estrito da engenharia, mas sim estratégico-tecnológica, considerando implicações operacionais, regulatórias e políticas. São examinadas

dimensões como a complexidade da arquitetura embarcada, a interoperabilidade com sistemas C4ISR, a segurança cibernética de plataformas conectadas em rede, e os entraves à formação de recursos humanos. O conteúdo está organizado em três blocos principais: os desafios da integração (3.1), a viabilidade técnica e operacional (3.2), e a adaptação de modelos internacionais ao contexto brasileiro (3.3).

3.1 Desafios da Integração

A integração de tecnologias letais autônomas em plataformas aéreas, especialmente no contexto da MB, envolve um conjunto intrincado de desafios sistêmicos. Esses desafios não se restringem à conexão física entre sensores, atuadores e sistemas de missão, mas abrangem incompatibilidades doutrinárias, lacunas institucionais, riscos cibernéticos e barreiras regulatórias que comprometem a plena funcionalidade e soberania do sistema (UNIDIR, 2021; EMA-415, 2024).

Feldman *et al.* (2019) destacam a crescente complexidade das arquiteturas autônomas militares, especialmente à medida que incorporam IA embarcada, fusão de sensores multiespectrais e decisões algorítmicas de engajamento. Diante disso, o Departamento de Defesa dos EUA passou a adotar a abordagem MOSA, que propõe a construção de sistemas com interfaces padronizadas, modularidade funcional e camadas logicamente desacopladas, como forma de mitigar riscos e facilitar a evolução incremental de tecnologias críticas (UNITED STATES, 2025b).

No caso brasileiro, esses obstáculos se aprofundam devido a restrições estruturais: fragmentação industrial, ausência de padrões nacionais interoperáveis, dependência tecnológica em sensores e enlaces, escassez de recursos humanos e carência de centros de experimentação e validação cibernética (Moreira, 2013; EMA-415, 2024). Tais fatores não apenas dificultam a nacionalização de tecnologias sensíveis, como também expõem o país a vulnerabilidades estratégicas e operacionais, especialmente em cenários de negação de acesso e comprometimento cibernético.

Para fins de análise, optou-se por organizar os desafios da integração em cinco dimensões estruturantes, definidas a partir da recorrência desses fatores na literatura técnico-estratégica e nos documentos institucionais analisados, bem como de sua transversalidade em diferentes tipos de missão e tarefas operacionais. Essa abordagem privilegia os fatores estruturais que condicionam o desenvolvimento e a integração da capacidade como um todo, em vez de analisar

tarefas operacionais isoladas. Assim, os desafios são examinados nas seguintes dimensões interdependentes:

- Técnica, com foco na complexidade dos sistemas embarcados e na necessidade de arquiteturas resilientes;
- Tecnológica, voltada à dependência de componentes críticos e ao cerceamento tecnológico imposto por potências fornecedoras;
- Operacional, considerando os entraves à interoperabilidade entre sistemas legados e plataformas emergentes;
- Cibernética, relativa à exposição a ataques, sabotagens e degradação informacional; e
- Formativa, associada à formação de pessoal qualificado e à articulação institucional da trílice hélice no Brasil.

3.1.1 Complexidade Técnica e Arquitetura de Sistemas

A complexidade técnica de um SAAL embarcado em plataformas aéreas exige uma arquitetura que integre, de forma coordenada, subsistemas de percepção, navegação, comunicação, decisão e engajamento (NIST, 2007; Feldman *et al.*, 2019). Cada módulo requer sensores, atuadores, enlaces de dados, processadores embarcados e lógicas de controle que operem em tempo real, com tolerância a falhas, mesmo em ambientes contestados ou de conectividade intermitente. Essa arquitetura precisa ser resiliente, segura e escalável, de forma a garantir não apenas a funcionalidade, mas a confiabilidade operacional em missões críticas.

A integração desses subsistemas é intensificada quando a autonomia aumenta. A cada incremento nas funções delegadas à máquina, cresce a necessidade de interoperação entre sensores multiespectrais (EO/IR, LIDAR, SAR), módulos de fusão de dados, IA embarcada e atuadores de precisão. Para que um SAAL funcione adequadamente com supervisão humana reduzida, torna-se essencial a adoção de arquiteturas que desacoplem as funções críticas do hardware e garantam a integridade do comportamento algorítmico mesmo sob ataques ou falhas.

Feldman *et al.* (2019) apontam que a confiabilidade dos sistemas autônomos letais depende da implementação de camadas de isolamento funcional, verificadores formais de segurança e validação iterativa de algoritmos. Eles alertam que o uso de IA em decisões sensíveis à vida humana deve ser necessariamente acompanhado por mecanismos de contenção

e por sistemas de auditoria automatizada, capazes de registrar e verificar a conformidade das decisões algorítmicas.

Nesse contexto, o Departamento de Defesa dos EUA adotou a abordagem MOSA, um marco conceitual e técnico que preconiza o uso de interfaces padronizadas, modularidade funcional e separação lógica entre hardware e software (UNITED STATES, 2025b). O modelo MOSA busca garantir a interoperabilidade entre sistemas legados e emergentes, reduzir custos de integração, acelerar a atualização tecnológica e evitar o lock-in com fornecedores exclusivos. A arquitetura é compatível com padrões como SOSA e VITA²⁴, que permitem a integração de módulos de missão e sensores em aeronaves militares com escalabilidade e agilidade operacional (THE OPEN GROUP, 2021; VITA, 2017).

A aplicação do modelo MOSA é especialmente relevante em sistemas autônomos com inteligência artificial embarcada. Em tais plataformas, a latência é um fator crítico. A necessidade de tomar decisões em frações de segundo impede a dependência de processamento remoto em nuvem e exige a adoção de processamento local, no próprio equipamento (Ramachandran *et al.*, 2021). Essa abordagem melhora a confiabilidade, mas impõe restrições de energia, capacidade computacional e gerenciamento térmico que devem ser considerados na engenharia de sistemas embarcados.

O relatório *Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems* (Boulanin; Verbruggen, 2017) reforça a tendência de adoção de arquiteturas modulares e distribuição da capacidade decisória em redes de sensores e atuadores, como forma de mitigar riscos de falha sistêmica e aumentar a redundância operacional. Já o estudo *Control and Application of Multiple UAVs in an Integrated C4ISR Environment* (Herdman; Kruk, 2006) demonstra como sistemas autônomos em rede, com módulos de comunicação interdependentes, exigem arquiteturas resilientes à perda de enlaces e capazes de operar mesmo em condições degradadas.

A aplicação da arquitetura MOSA, segundo o *Implementation Guidebook* (UNITED STATES, 2025b), reduz o ciclo de atualização de componentes, permite a substituição rápida de módulos comprometidos e facilita a inserção de novas tecnologias, inclusive de origem civil. Isso é especialmente relevante para países com base industrial limitada, como o Brasil, pois permite adotar uma estratégia de integração progressiva de capacidades sensíveis.

²⁴ SOSA (Sensor Open Systems Architecture) é uma arquitetura aberta desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos EUA para sistemas de missão embarcados. Ela se apoia em padrões técnicos da VITA (VMEbus International Trade Association), como o OpenVPX (VITA 65), que definem requisitos físicos, elétricos e de interface para módulos interoperáveis e substituíveis.

No entanto, a realidade brasileira apresenta desafios concretos. Conforme Moreira (2013), o país sofre com a dependência de sensores, processadores e enlaces importados, o que dificulta a customização da arquitetura dos SARP para os requisitos da Marinha. Esses componentes, muitas vezes sujeitos a restrições de exportação e licenças de uso, comprometem a soberania operativa, especialmente quando operam como “caixas-pretas” que impedem modificações locais ou atualizações seguras.

Como observa Verbruggen (2019), a integração de inovações civis em sistemas militares pode mitigar custos e acelerar o ciclo de inovação, mas depende de padrões abertos, certificação de segurança e mecanismos de validação robustos. A ausência de centros nacionais de certificação para sistemas com IA embarcada e a escassez de testes operacionais em cenários reais são entraves à adoção segura dessas arquiteturas no Brasil.

O emprego efetivo de uma arquitetura embarcada compatível com operações navais requer compatibilidade com sistemas C4ISR, doutrina de interoperabilidade e capacidade de missão autônoma em ambiente contestado. O desenvolvimento de uma arquitetura nacional adaptada ao modelo MOSA, com componentes validados e módulos substituíveis, representa uma condição necessária para a evolução dos SARP brasileiros rumo à autonomia operacional efetiva.

3.1.2 Cerceamento Tecnológico e Dependência Externa

A tentativa de integrar sistemas letais autônomos em plataformas aéreas brasileiras encontra um dos seus maiores entraves na realidade do cerceamento tecnológico. Esse fenômeno, caracterizado por restrições formais e informais à transferência de tecnologias críticas, tem impactos profundos sobre a capacidade do país de desenvolver sensores, enlaces criptografados, processadores embarcados e algoritmos de decisão autônoma, todos essenciais à construção de uma arquitetura soberana para SARP com capacidade letal.

Segundo Moreira (2013), o cerceamento tecnológico não deve ser compreendido apenas como uma limitação industrial, mas como um instrumento geopolítico deliberado. Países líderes em tecnologia de defesa impõem controles severos à exportação de tecnologias de uso dual, algoritmos sensíveis e microeletrônica embarcada, sob a justificativa de segurança internacional e não proliferação. O resultado é um bloqueio sistêmico ao acesso, modificação e nacionalização de componentes críticos.

Boulanin e Verbruggen (2017), em estudo publicado pelo SIPRI, mapearam o desenvolvimento da autonomia em sistemas de armas, destacando como a ausência de

transparência e as restrições de acesso a tecnologias sensíveis limitam a capacidade de validação plena de sistemas adquiridos. Em sistemas com inteligência artificial embarcada, a ausência de acesso ao código-fonte torna impossível validar a lógica decisória, o que compromete a segurança operacional e a conformidade legal do uso da força letal.

No caso da Turquia, apesar do sucesso do Bayraktar TB2, houve relatos de dificuldades para importar certos sensores e componentes eletrônicos de origem europeia e norte-americana, o que motivou o desenvolvimento interno de substitutos (Verbruggen, 2019; PAX, 2017).

De forma semelhante, a Índia tem buscado reduzir sua dependência por meio de programas de nacionalização tecnológica, enfrentando barreiras relacionadas à transferência de software embarcado e algoritmos sensíveis (Altmann; Sauer, 2017).

Esses exemplos demonstram que, mesmo em países com tradição em autossuficiência parcial, como Turquia e Índia, persistem limitações significativas no acesso a tecnologias militares críticas, incluindo sensores avançados, sistemas criptografados e capacidades de inteligência artificial embarcada. A resposta tem sido o fortalecimento de capacidades nacionais de desenvolvimento e a exigência de contrapartidas tecnológicas em acordos internacionais, como forma de mitigar vulnerabilidades associadas ao cerceamento tecnológico (Verbruggen, 2019; PAX, 2017).

No caso brasileiro, entretanto, essa estratégia encontra obstáculos adicionais. A fragmentação industrial, somada à ausência de mecanismos jurídicos eficazes de cobrança e acompanhamento dos compromissos de transferência tecnológica, compromete a adoção de políticas semelhantes. Essa realidade fragiliza a capacidade nacional de reduzir dependências externas e aumenta o risco de vulnerabilidade em cenários de restrição internacional.

Outro aspecto relevante é a dificuldade de acessar ou compreender plenamente os sistemas adquiridos, muitas vezes entregues sem documentação completa, com software criptografado ou sem possibilidade de modificação. Essa característica, referida aqui como “caixa-preta tecnológica”, impede que técnicos nacionais realizem manutenção, adaptação ou atualização local dos sistemas. Isso representa um risco operacional grave, especialmente em cenários de negação de acesso ou ruptura diplomática com países fornecedores (Verbruggen, 2019).

Além disso, o cerceamento tecnológico impõe limitações estruturais ao Brasil em três frentes principais: o acesso a componentes sensíveis; a capacidade de adaptar e nacionalizar tecnologias importadas; e a formação de pessoal especializado. Conforme demonstrado por Moreira (2013), essas restrições não se limitam à aquisição de artefatos físicos, mas abrangem também a negação de serviços associados, transferência de conhecimento, treinamento técnico

e acesso a insumos críticos para pesquisa aplicada, afetando diretamente instituições científicas, industriais e programas estratégicos nacionais.

Experiências internacionais sugerem caminhos possíveis. Países como Coreia do Sul, Israel, China e Turquia têm adotado mecanismos contratuais para exigir o repasse gradual de conhecimento técnico como condição para compras militares (TRADE.GOV, 2023).

Também se observa o uso de cláusulas de “compensação industrial” (*offset*), que obrigam o fornecedor estrangeiro a investir na indústria local ou contratar empresas nacionais. Em alguns casos, ocorre o chamado “*offset* reverso”, quando o país exportador passa a comprar componentes ou serviços do país comprador como parte do acordo, prática mencionada em relatórios internacionais de comércio de defesa (BIS, 2022).

Outro caminho adotado tem sido a cooperação com países que não fazem parte de consórcios restritivos, como o Regime de Controle de Wassenaar. Este regime é um acordo multilateral firmado em 1996 por 42 países, incluindo Estados Unidos, União Europeia e Japão, que busca controlar a exportação de armas convencionais e tecnologias de uso dual, visando prevenir que esses itens sejam transferidos a atores considerados de risco. A lista de controle do Wassenaar inclui sensores, softwares, algoritmos de navegação autônoma, sistemas de fusão de dados e componentes eletrônicos sensíveis.

Contudo, a adesão ao Regime de Wassenaar também implica limitações: países signatários devem obedecer à diretrizes sobre o que pode ser exportado e para quem, o que afeta diretamente a disponibilidade de sensores, enlaces criptografados e softwares embarcados com inteligência artificial. Dessa forma, países como o Brasil precisam equilibrar sua inserção internacional com o desenvolvimento de capacidades autônomas nacionais.

Portanto, romper o ciclo de dependência e cerceamento tecnológico exige não apenas investimentos, mas uma política industrial e diplomática articulada. Nas seções seguintes, serão abordadas as demais barreiras à integração de SAAL em SARP, incluindo interoperabilidade, cibersegurança e formação de recursos humanos.

3.1.3 Barreiras Operacionais e de Interoperabilidade

A integração de tecnologias autônomas letais em plataformas militares requer compatibilidade entre os novos sistemas embarcados e as infraestruturas legadas já existentes nas FA, particularmente nos sistemas C4ISR. No contexto da MB, a interoperabilidade entre os SARP com funções autônomas e as plataformas navais e terrestres representa um dos maiores obstáculos à plena utilização dessas capacidades.

A interoperabilidade pode ser entendida como a capacidade de diferentes sistemas, mesmo quando desenvolvidos por fornecedores distintos e baseados em arquiteturas proprietárias, de trocarem dados de maneira segura, confiável e tempestiva. Essa capacidade é essencial para permitir ações coordenadas, transferência de informações táticas e comando unificado em tempo real.

No entanto, a ausência de protocolos padronizados, interfaces abertas e camadas de integração entre subsistemas compromete essa sinergia operacional, gerando fricções que impactam desde o planejamento tático até a execução de missões de vigilância e ataque (Boulanin; Verbruggen, 2017; Feldman; Dant; Massey, 2019).

O problema é agravado no Brasil pela composição heterogênea do parque tecnológico das FA, resultado da aquisição de sistemas de diferentes gerações, doutrinas e origens nacionais. Essa diversidade impõe barreiras reais à interoperabilidade, como diferenças em criptografia, protocolos de enlace de dados e linguagens de comunicação. Em muitos casos, a integração só é possível por meio de soluções improvisadas, que comprometem a certificação e a confiabilidade operacional (JAPCC, 2023; Hoekstra, 2020).

Nesse sentido, a interoperabilidade também depende da flexibilidade arquitetural das redes e dos meios aéreos empregados. O projeto INTERACT da União Europeia demonstra a importância de definir padrões de interoperabilidade para UAVs, de modo a garantir que subsistemas e módulos possam operar em conjunto mesmo quando oriundos de fornecedores distintos. Esses padrões incluem aspectos de comunicação, controle, sensores e lógica de missão, propondo inclusive estruturas comuns de certificação (EDA, 2023; Müller *et al.*, 2023).

Em resposta a esse desafio, os Estados Unidos adotaram a arquitetura MOSA, concebida não apenas como instrumento de inovação, mas sobretudo como marco técnico para a interoperabilidade. Ao exigir interfaces abertas e módulos substituíveis, o MOSA viabiliza a integração de subsistemas de diferentes fornecedores em um mesmo ecossistema operacional, garantindo que novas tecnologias possam ser incorporadas sem comprometer a compatibilidade entre plataformas aéreas, navais e terrestres (UNITED STATES, 2025a).

No caso dos SARP, o desafio se intensifica pela necessidade de operação cooperativa com meios navais como fragatas, navios de patrulha oceânica e sistemas de comando em terra. A integração com radares navais, enlaces satelitais e guerra eletrônica exige uma infraestrutura digital resiliente, com redundância, baixa latência e segurança criptográfica reforçada. A guerra da Ucrânia revelou que sistemas distribuídos e redes interoperáveis foram essenciais para manter a continuidade operacional sob interferência ativa, reforçando a importância de arquiteturas adaptáveis.

Redes táticas ad hoc entre UAVs, as FANETs, têm se mostrado alternativas promissoras para a operação cooperativa entre plataformas. Essas redes utilizam protocolos de roteamento adaptativos e capacidade de auto-organização, mas ainda enfrentam desafios de latência, interferência e integração com redes de comando convencionais (Bekmezci *et al.*, 2013). A combinação dessas redes com enlaces via satélite de baixa órbita (LEO - *Low Earth Orbit*²⁵) e sistemas 5G também foi destacada como tendência emergente para manter a continuidade operacional sob forte contestação (Lagunas *et al.*, 2024).

Um aspecto especialmente sensível da interoperabilidade é o alinhamento com as regras de engajamento e a responsabilização pelo uso da força letal. Heather M. Roff (2017) alerta que, à medida que os sistemas ganham autonomia decisória, a falta de clareza nas interfaces homem-máquina (HMI) e nos protocolos de comando pode diluir a autoridade humana e comprometer a atribuição de responsabilidade. Sistemas mal integrados ou com HMI proprietárias dificultam a supervisão em tempo real, criando riscos operacionais e éticos graves.

Como observam o autor, a autonomia sem controle humano significativo mina a própria lógica do comando militar e torna questionável a legalidade e legitimidade de certas ações. Adicionalmente, o conceito de comando de missão, amplamente debatido no contexto do JADC2 (*Joint All-Domain Command and Control*), impõe requisitos adicionais de interoperabilidade doutrinária. UNITED STATES (2019) aponta que, para a descentralização do comando ser eficaz, é preciso que os sistemas sejam interoperáveis tanto do ponto de vista técnico quanto do entendimento comum de missão, contexto e prioridade, exigindo camadas de interoperabilidade semântica e decisória.

A interoperabilidade não depende apenas da compatibilidade técnica, mas também da existência de marcos normativos, procedimentos operacionais padronizados e programas de adestramento conjuntos. A Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (EMA-415, 2024) reconhece a importância de fortalecer a articulação entre a Marinha, a indústria e a academia, por meio de ambientes dedicados à experimentação, validação tecnológica e capacitação em tecnologias emergentes, visando garantir segurança, atualização contínua e interoperabilidade em sistemas embarcados.

Portanto, superar as barreiras operacionais e de interoperabilidade no Brasil exigirá não apenas investimentos em arquitetura técnica, mas também a construção de consensos

²⁵ LEO (*Low Earth Orbit*) refere-se a satélites operando em órbitas terrestres baixas, tipicamente entre 160 km e 2.000 km de altitude, caracterizadas por menor latência e maior adequação a enlaces de dados em tempo quase real quando comparadas a satélites em órbita geoestacionária.

institucionais, desenvolvimento de normas interoperáveis nacionais e inserção em regimes multilaterais que facilitem a integração segura e eficaz entre sistemas de defesa emergentes.

3.1.4 Vulnerabilidades Cibernéticas e Falhas de Segurança

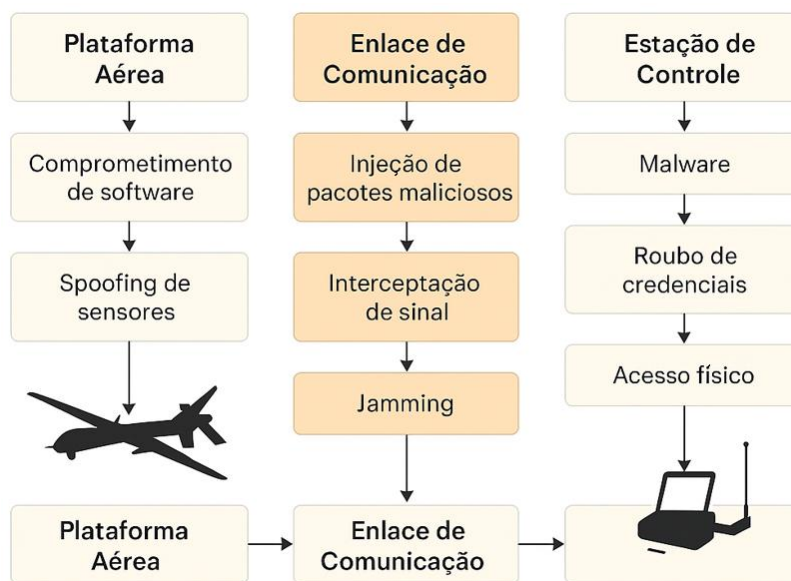
À medida que os sistemas de armas autônomas letais, especialmente aqueles integrados em SARP, se tornam mais sofisticados, conectados em rede e operam com níveis crescentes de autonomia, também aumentam significativamente os vetores de ataque cibernético, a exposição à guerra eletrônica e os riscos de falhas sistêmicas.

Em contextos de guerra centrada em redes, nos quais plataformas aéreas, sensores, armas e centros de comando estão interconectados, a cibersegurança deixa de ser apenas uma camada adicional de proteção e passa a constituir um elemento central da capacidade operacional (MITRE, 2011). A possibilidade de interferência maliciosa em sistemas críticos não apenas ameaça o sucesso de uma missão, como também pode comprometer a integridade de forças amigas ou resultar em danos colaterais a civis, com implicações estratégicas e éticas.

Os SARP armados com funções autônomas operam com uma arquitetura complexa que envolve múltiplas camadas de sensores, processamento embarcado e enlaces criptografados de comunicação. Tais plataformas utilizam sistemas de navegação integrados, como GNSS, INS (*Inertial Navigation System*) e, em alguns casos, técnicas visuais como SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), além de algoritmos de inteligência artificial responsáveis por tarefas de percepção, rastreamento, classificação e, eventualmente, engajamento de alvos. Esses componentes são alvos potenciais de ataques do tipo *spoofing*, que enganam os sistemas de navegação, *jamming*, que bloqueiam ou degradam sinais eletromagnéticos, além de técnicas mais avançadas, como a injeção de pacotes maliciosos nos protocolos de comunicação e a exploração de vulnerabilidades em firmwares embarcados (Shafique *et al.*, 2021; Ceviz *et al.*, 2023).

A Figura 14 apresenta uma representação esquemática dos principais vetores de ataque cibernético que podem comprometer o funcionamento de SARP. Organizados em três eixos distintos, plataforma aérea, enlace de comunicação e estação de controle, os ataques incluem desde interferências por *jamming* e *spoofing* até injeções de pacotes maliciosos e comprometimento do firmware embarcado. A separação por blocos evidencia que a superfície de ataque não se limita ao drone em si, mas abrange toda a infraestrutura digital e física envolvida na operação, reforçando a necessidade de abordagens abrangentes de segurança cibernética.

Figura 14 - Vetores de ataque cibernético em sistemas aéreos remotamente pilotados



Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de Shaukat *et al.*, 2020 e Hartmann; Steup (2013)

O grau de autonomia da plataforma está diretamente relacionado ao nível de exposição cibernética. Quanto menor a supervisão humana, por exemplo, em modos humano sobre o circuito (*human-on-the-loop*) ou humano fora do circuito (*human-out-of-the-loop*), maior a dependência de processos decisórios baseados em redes neurais profundas, lógica probabilística e algoritmos de aprendizado de máquina. Esse arcabouço computacional, embora poderoso, apresenta vulnerabilidades conhecidas, entre elas as chamadas perturbações adversárias (*adversarial perturbations*). Trata-se de pequenas alterações introduzidas nos dados de entrada, como imagens, sons ou sinais de radar, que são imperceptíveis para o olho ou ouvido humano, mas capazes de induzir o sistema a erros graves de classificação, como confundir um drone hostil com um pássaro ou não reconhecer um alvo militar.

Essa fragilidade assume contornos ainda mais relevantes no contexto brasileiro, onde restrições orçamentárias, institucionais e operacionais limitam a geração sistemática de dados empíricos provenientes de cenários reais ou altamente representativos de emprego militar.

Nessas condições, o treinamento de modelos de aprendizado de máquina tende a apoiar-se predominantemente em conjuntos de dados reduzidos, simulados ou pouco diversificados, o que compromete a robustez dos sistemas diante de variações não previstas em ambientes operacionais complexos.

Como apontado por estudos clássicos sobre vulnerabilidades em aprendizado de máquina, modelos treinados nessas condições apresentam maior suscetibilidade a erros de

generalização e degradação de desempenho quando expostos a contextos distintos daqueles observados durante o treinamento (Goodfellow *et al.*; Biggio; Roli, 2018).

A vulnerabilidade é ainda mais grave quando os sistemas são treinados com conjuntos de dados limitados ou não representativos de situações reais de combate, reduzindo a robustez do modelo diante de variações operacionais.

Em termos de infraestrutura crítica, a segurança cibernética dos enlaces de Comando e Controle (C2) representa uma preocupação central. As redes C2 devem ser resilientes a ataques de negação de serviço (DDoS), tentativas de interceptação, degradação intencional de desempenho e perda temporária de conectividade com satélites ou estações terrestres.

A robustez dessas redes depende da implementação de criptografia de grau militar, autenticação de múltiplos fatores, protocolos tolerantes a falhas e redundância física dos enlaces, capacidades que ainda são limitadas no contexto brasileiro (MITRE, 2011). A ausência de padronização interoperável entre os diferentes sistemas das FA também aumenta os riscos de brechas não intencionais, ampliando a superfície de ataque em cenários operacionais híbridos.

No caso brasileiro, a dependência de componentes estrangeiros em áreas críticas como microeletrônica, firmwares, sistemas criptográficos e sensores embarcados constitui uma vulnerabilidade estratégica relevante. A ausência de uma base industrial consolidada em semicondutores e de cadeias de fornecimento plenamente auditáveis limita a capacidade nacional de verificação, validação e certificação de sistemas críticos, aumentando o risco de inserção de funcionalidades não documentadas, degradação deliberada de desempenho ou restrições ocultas de uso.

Do ponto de vista operacional, essa dependência compromete a confiabilidade dos SARP em cenários de crise ou conflito, nos quais a previsibilidade do comportamento do sistema e a integridade dos enlaces e sensores são condições mínimas para o emprego seguro de funções autônomas letais.

Como argumenta Moreira (2013), essa dependência compromete a soberania operacional e tecnológica da defesa nacional, tornando os sistemas vulneráveis não apenas a falhas técnicas, mas à interferência de terceiros em sua lógica de funcionamento.

Outro fator limitante é a escassez de estruturas nacionais dedicadas à validação, simulação e certificação da segurança cibernética de sistemas autônomos. Países como Estados Unidos, China e Israel possuem centros especializados em testes de robustez frente a ciberataques, guerra eletrônica e sabotagem lógica, com ambientes controlados para a execução de *red teaming*, *penetration testing* e simulações adversariais. Nos EUA, destaca-se o *National*

Cyber Range Complex (NCRC), infraestrutura do Departamento de Defesa para avaliação e treinamento de sistemas críticos (UNITED STATES TRMC, 2025). Em Israel, o polo de Beersheba consolidou-se como hub de treinamento em ciberdefesa militar, com iniciativas conjuntas entre forças armadas e indústria (Frantzman, 2022). Já a China estabeleceu o *National Cybersecurity Center* (NCC) em Wuhan, dedicado à pesquisa, formação e simulações avançadas de cibersegurança (CSET, 2020).

No Brasil, apesar de iniciativas dispersas em instituições como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Centro Tecnológico do Exército (CTEx), não há, até o momento, uma infraestrutura dedicada exclusivamente à certificação cibernética de plataformas autônomas letais. Essa lacuna institucional dificulta a construção de doutrina, o desenvolvimento de normas técnicas e a validação operacional de sistemas em ambiente hostil.

A integração crescente entre SAAL e sistemas C4ISR amplia ainda mais os riscos. A interdependência entre coleta de dados, análise tática automatizada e tomada de decisão distribuída pode criar pontos únicos de falha, caso não sejam implementadas barreiras eficazes contra manipulação de dados e degradação de confiança na rede. Estudos recentes mostram que a sincronização entre múltiplas plataformas UAV operando em rede exige um equilíbrio delicado entre latência, confiabilidade e segurança, o que implica investimentos substanciais em ciber-resiliência desde as fases iniciais do projeto (Shrestha *et al.*, 2025).

Por fim, o avanço no emprego de inteligência artificial embarcada para controle de missão, análise em tempo real e priorização de alvos levanta preocupações adicionais quanto à opacidade algorítmica e à dificuldade de auditar decisões tomadas de forma autônoma. Em caso de comprometimento de dados sensoriais, o sistema pode apresentar comportamentos imprevisíveis, sem possibilidade de intervenção humana em tempo hábil, o que realça a urgência de mecanismos de segurança automática e protocolos de interrupção segura. A cibersegurança, nesse contexto, deve ser tratada não como um aditivo, mas como uma característica fundamental do projeto de sistemas letais autônomos, especialmente em ambientes marítimos de baixa infraestrutura e alta exposição eletromagnética.

3.1.5 Formação de Recursos Humanos e Integração da Trílice Hélice

A formação de capital humano altamente qualificado é um fator estruturante e inadiável para o desenvolvimento soberano de sistemas de armas autônomas letais. Tecnologias sensíveis como inteligência artificial, fusão de sensores, guerra eletrônica, automação de decisão e

navegação autônoma exigem competências interdisciplinares que combinam engenharia, ciência da computação, ciências militares e análise estratégica.

É necessário estruturar um ecossistema nacional que integre, de forma estratégica, os três principais atores do sistema de inovação: Estado, BID e academia, os vértices da chamada tríplice hélice (Etzkowitz; Zhou, 2017).

O modelo da tríplice hélice pressupõe sinergia entre instituições públicas, setor produtivo e universidades para geração, disseminação e aplicação de conhecimento tecnológico. Essa articulação é ainda mais crítica quando se trata de tecnologias emergentes com duplo uso e implicações para a soberania nacional. A capacidade de projetar, operar e adaptar sistemas letais autônomos em ambiente operacional adverso depende diretamente da existência de profissionais especializados em engenharia de sistemas complexos, inteligência computacional, doutrina militar e segurança cibernética, formados em centros de excelência, como universidades de pesquisa e institutos militares especializados, integrados a ambientes de experimentação.

No entanto, o Brasil apresenta gargalos estruturais nesse campo. Apesar da existência de grupos de excelência em universidades e institutos de pesquisa, essas iniciativas permanecem dispersas, com baixa coordenação interinstitucional e fraca inserção da BID e das FA nos projetos.

Falta uma agenda estratégica unificada que alinhe as necessidades operacionais da defesa com as linhas de pesquisa acadêmica e os planos de investimento industrial. Esse desalinhamento já havia sido antecipado por Moreira (2013), em sua tese sobre cerceamento tecnológico, ao afirmar:

Não se pode dizer que haja no país um sistema setorial de inovação para a defesa, sem o que [...] determinados saltos tecnológicos pretendidos não podem ser alcançados por decretos ou leis, mas pelo resultado de políticas públicas e ações mobilizadoras concertadas” (Moreira, 2013, p. 193).

Em comparação internacional, diversos países estruturaram de forma bem-sucedida ecossistemas de formação dual voltados à defesa autônoma. A Coreia do Sul, por exemplo, estabeleceu em 2019 uma Estratégia Nacional de Inteligência Artificial, que inclui programas de formação avançada e integração com a indústria de defesa (REPUBLIC OF KOREA, 2019; Park, 2024).

Em contextos internacionais, observa-se que a consolidação de capacidades em sistemas aéreos não tripulados depende menos dos produtos finais e mais da existência de arranjos institucionais estáveis entre universidades, indústria e políticas de inovação. O caso suíço ilustra esse aspecto ao evidenciar como laboratórios acadêmicos de robótica e visão computacional, vinculados à ETH Zurich e à EPFL, atuam como núcleos de pesquisa aplicada, transferência tecnológica e formação de spin-offs no setor de drones.

Mais do que os sistemas desenvolvidos, esse modelo destaca a relevância dos mecanismos de articulação institucional, da previsibilidade de financiamento e da proximidade entre pesquisa e aplicação, elementos centrais para compreender os desafios enfrentados pelo Brasil (EPFL, 2011; EPFL, 2012; ETH Zurich, 2025).

Israel também é referência, com programas acadêmicos avançados em universidades como Technion e Tel Aviv, que se articulam com a indústria de defesa, incluindo empresas como Rafael e Elbit Systems, e com o Ministério da Defesa, fortalecendo a base nacional de conhecimento em áreas críticas de inteligência artificial, robótica e cibersegurança (Israel, s. d.)

Relatórios do UNIDIR reforçam esse ponto ao documentar exercícios de simulação que exploram como operadores e sistemas autônomos interagem em diferentes cenários de combate.

Países como Estados Unidos e Reino Unido investem em centros especializados de simulação e treinamento. O Exército norte-americano desenvolveu o *Synthetic Training Environment* (STE, 2018), que integra realidade virtual, inteligência artificial e ensaios operacionais em escala para sistemas autônomos. Já o Reino Unido, por meio do *Defence Science and Technology Laboratory* (DSTL, s. d.), conduz projetos de simulação em conjunto com universidades e institutos independentes, voltados a treinar militares no uso seguro de tecnologias emergentes (DSTL, 2020; U.S. Army, 2021).

Esses estudos mostram a importância de preparar pessoas para intervir rapidamente quando a máquina falha ou toma decisões inadequadas, garantindo que haja sempre a possibilidade de retomar o controle humano em situações críticas.

No Brasil, há esforços pontuais que podem ser considerados passos iniciais nessa direção. A criação do Esquadrão de Guerra Cibernética da Marinha em 2024, subordinado ao Comando Naval de Operações Especiais, representa um avanço institucional relevante, ao reconhecer a ciberdefesa como domínio estratégico com implicações operacionais imediatas (BRASIL, 2024).

Paralelamente, a Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (EMA-415, 2024) destaca a necessidade de formação de pessoal qualificado em áreas críticas como IA,

guerra eletrônica e sensores, embora ainda careça de planos orçamentários e metas quantitativas claras.

O país também dispõe de estruturas relevantes, mas pouco integradas, como o Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), o Centro Tecnológico do Exército (CTEx), o Centro de Instrução de Guerra Eletrônica (CIGE) e o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), que poderiam formar a base para centros integrados de capacitação. Contudo, não se observa a existência de uma política nacional integrada e explicitamente voltada à formação de especialistas em tecnologias autônomas, o que, combinado à fragmentação dos programas de pós-graduação em engenharia e defesa, limita o surgimento de uma estratégia sistêmica de capacitação.

A análise realizada ao longo deste trabalho indica a ausência de estruturas nacionais formalizadas e dedicadas à validação, certificação e adestramento de pessoal em sistemas de armas autônomas letais, configurando um relevante gargalo institucional. A operação de drones armados com funções autônomas não pode depender de improvisação técnica. Requer formação contínua, acesso a ambientes simulados realistas, conhecimento em algoritmos de tomada de decisão e domínio das doutrinas de emprego. A criação de centros especializados, com laboratórios de simulação, campos de testes, plataformas modulares e integração com a BID e as universidades, é condição para garantir a segurança, a eficácia e a legitimidade do uso de SAAL no ambiente marítimo.

Do ponto de vista da governança, a consolidação da tríplice hélice em defesa exige instrumentos permanentes de coordenação e fomento. A criação de comitês interinstitucionais, editais voltados a projetos dual use e programas de bolsas orientadas por demandas estratégicas poderiam fomentar essa articulação.

Órgãos como CNPq, FINEP e CAPES possuem histórico de fomento científico e tecnológico com impacto indireto no setor de defesa, por meio de iniciativas como o programa Pró-Defesa, os Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT) e programas voltados ao setor aeroespacial e de inovação. No entanto, esses instrumentos não são estruturados especificamente para o desenvolvimento de tecnologias sensíveis de defesa, o que limita o estímulo à formação aplicada e à integração entre a produção científica e as demandas operacionais das Forças Armadas.

Nesse contexto, documentos estratégicos nacionais destacam a importância da ciência, tecnologia e inovação para a soberania e o desenvolvimento do país, bem como a necessidade de fortalecimento da Base Industrial de Defesa e da autonomia tecnológica. A inclusão explícita de áreas emergentes, como sistemas autônomos aplicados à defesa, nas diretrizes da Estratégia

Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação e da Estratégia Nacional de Defesa, apresenta-se como elemento central para reduzir a fragmentação institucional e orientar investimentos de longo prazo (BRASIL, 2016; BRASIL, 2020).

A valorização de talentos nacionais também passa por mecanismos de atração e retenção. A criação de cargos técnicos especializados, a contratação direta por laboratórios de defesa e a valorização salarial em áreas críticas como IA e cibersegurança são políticas necessárias para evitar a evasão de cérebros e garantir continuidade aos programas. Além disso, a colaboração internacional deve ser seletiva, priorizando parcerias que garantam acesso real a conhecimento sensível, evitando dependência tecnológica ou transferência assimétrica de capacidades.

A formação de recursos humanos não se limita à dimensão técnica. A construção de capacidades autônomas letais exige também um corpo estratégico de especialistas capaz de entender as implicações políticas, legais e éticas do uso da força mediado por máquinas. Portanto, a formação deve incluir também profissionais das ciências sociais, direito, filosofia, estudos estratégicos e relações internacionais, integrados aos engenheiros e operadores. Esse horizonte ampliado é indispensável para que o Brasil possa desenvolver e empregar SAAL com legitimidade, controle e responsabilidade soberana.

3.1.6 Considerações parciais sobre a integração tecnológica

A análise da integração tecnológica de sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas não tripuladas evidencia que o Brasil ainda enfrenta barreiras de ordem estrutural, institucional e tecnológica que limitam sua capacidade de acompanhar os avanços registrados em países com alto grau de maturidade industrial e domínio sobre tecnologias sensíveis. Apesar de existirem iniciativas pontuais em universidades, centros de pesquisa e empresas da BID, a fragmentação dessas ações e a ausência de políticas articuladas dificultam a construção de um ecossistema de inovação em defesa coeso e resiliente.

O desafio da integração de sistemas autônomos não se limita à incorporação de algoritmos de decisão ou sensores avançados. Trata-se de um processo integrado e de alta complexidade, que envolve desde a concepção da arquitetura embarcada até a validação operacional em cenários de missão. Esse processo exige alta especialização, capacidade de teste em ambientes simulados e reais, e acesso contínuo a tecnologias críticas como inteligência artificial, sistemas de controle de voo, enlaces de comunicação segura, fontes de energia embarcadas, sensores optrônicos e softwares de fusão de dados.

Conforme discutido nos itens anteriores, a articulação entre governo, academia e setor produtivo, expressa no conceito de tríplice hélice, é fundamental para viabilizar projetos de elevada complexidade tecnológica. No entanto, essa articulação permanece incipiente no Brasil, especialmente no setor aeroespacial voltado a sistemas autônomos. A assimetria entre os atores, somada à instabilidade nos mecanismos de financiamento e à ausência de uma doutrina operacional clara para o uso de sistemas autônomos letais, impede o florescimento de competências críticas. As capacidades nacionais em áreas como sensores de alta resolução, visão computacional, motores de precisão e IA embarcada ainda dependem, em grande medida, de plataformas e know-how estrangeiros.

Estudos do CNAS (2021) e da RAND Corporation (Binnendijk; Gompert; Lin, 2014) apontam que a consolidação de capacidades autônomas exige ciclos longos de investimento e maturação tecnológica, além de centros especializados para testes, certificação e doutrinação. No Brasil, a falta de infraestrutura dedicada à experimentação e à validação de tecnologias autônomas, como laboratórios de simulação em tempo real, campos de testes controlados e unidades operacionais de demonstração, limita a capacidade de integrar tecnologias em ambientes reais de uso.

A atuação da MB oferece exemplos importantes que ilustram o potencial da integração institucional quando há alinhamento estratégico e continuidade orçamentária. O Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB), amplamente reconhecido como referência, demonstra que políticas industriais de longo alcance são possíveis quando há convergência entre interesse político, recursos financeiros e coordenação entre os atores públicos e privados.

No campo dos sistemas aéreos não tripulados com funções letais ou autônomas, observa-se uma lacuna expressiva entre as ambições declaradas nos documentos estratégicos e a capacidade atualmente instalada. Embora existam pontos de contato entre as Forças Armadas, especialmente no compartilhamento de conceitos gerais sobre sistemas não tripulados, automação e emprego dual de tecnologias, não se identifica, até o momento, um programa interforças estruturado voltado especificamente à integração de funcionalidades autônomas letais em sistemas aéreos.

Enquanto o Exército Brasileiro vem desenvolvendo sistemas táticos de menor porte com graus limitados de autonomia e a Força Aérea Brasileira explora conceitos como *teaming* e modularidade de cargas úteis, a Marinha do Brasil ainda carece de um projeto próprio que integre, de forma sistemática, sensores, inteligência artificial e sistemas de armamento em plataformas aéreas sob sua doutrina e requisitos operacionais específicos. Esse quadro sugere a

existência de convergências conceituais pontuais, mas não de uma coordenação programática efetiva entre as três Forças.

Essa lacuna se torna ainda mais relevante diante do aumento do uso de drones armados em conflitos contemporâneos, como na Ucrânia, onde a autonomia embarcada tem sido um diferencial tático relevante (RUSI, 2022).

Outro fator que compromete a integração tecnológica plena é o cerceamento tecnológico. Conforme argumenta Moreira (2013), esse fenômeno não decorre apenas do nível de desenvolvimento tecnológico dos países receptores, mas, sobretudo, de decisões políticas e estratégicas adotadas por Estados detentores de tecnologias sensíveis. O cerceamento resulta da combinação de barreiras formais e informais, incluindo regimes de controle de exportação, cláusulas restritivas em contratos, limitações à transferência de conhecimento crítico e exigências de certificações controladas externamente.

Nesse contexto, mesmo países com capacidades científicas e industriais relevantes enfrentam restrições significativas quando a difusão tecnológica é percebida como potencialmente prejudicial ao equilíbrio estratégico internacional. O efeito prático desse processo é a criação de dependências estruturais em áreas críticas, como sensores optrônicos, sistemas de navegação inercial de alta precisão, microprocessadores de uso militar e softwares embarcados proprietários, com impactos diretos sobre a autonomia de integração, manutenção e evolução dos sistemas desenvolvidos nacionalmente.

Relatórios das ONU (UNODA, 2023) e análises acadêmicas (Gilli, 2021) reforçam que o risco de *backdoors*, interferências não autorizadas ou interrupção logística em cenários de conflito deve ser considerado como elemento central no planejamento de integração tecnológica em defesa.

A lógica de cadeias de suprimento sob controle de potências tecnológicas pode inviabilizar, no momento decisivo, o pleno uso de plataformas críticas. A resiliência operacional, portanto, passa não apenas por desenvolver tecnologias próprias, mas também por ter capacidade nacional de testar, validar, modificar e integrar essas tecnologias de forma soberana.

Apesar dos entraves mencionados, identifica-se um movimento institucional em curso no âmbito da Marinha do Brasil que aponta para maior coordenação das atividades de ciência, tecnologia e inovação. A consolidação do Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (SCTIMar), associada à organização de polos regionais de pesquisa e desenvolvimento, sinaliza uma tentativa de superar a fragmentação histórica das iniciativas de

P&D, ao estruturar mecanismos permanentes de articulação entre unidades operativas, centros de pesquisa e a Base Industrial de Defesa.

Esse movimento está alinhado às diretrizes do EMA-415, que enfatiza a necessidade de integração sistêmica, priorização de áreas críticas e fortalecimento da capacidade endógena de inovação no médio e longo prazo, ainda que seus efeitos concretos dependam de continuidade orçamentária e institucional.

Nesse contexto, o estímulo a parcerias com universidades e centros tecnológicos, incluindo a formalização de acordos com instituições civis e militares de ensino e pesquisa, representa uma tentativa de aproximar os elos da trílice hélice em torno de projetos de maior complexidade tecnológica.

Outro elemento relevante no plano institucional é a criação, em 2024, do Esquadrão de Guerra Cibernética da Marinha, subordinado ao Comando Naval de Operações Especiais. Embora essa iniciativa represente primordialmente uma medida de organização interna e de fortalecimento da estrutura operacional da Força, sua existência indica o reconhecimento institucional da centralidade do domínio cibernético para a proteção de sistemas navais, enlaces de comando e controle e plataformas digitais críticas. Nesse sentido, não se trata de um instrumento de fomento à inovação, mas de uma capacidade habilitadora essencial para a operação segura de sistemas complexos, incluindo SARP com funções autônomas, em ambientes contestados.

Nesse contexto, a viabilidade da integração plena de tecnologias letais autônomas em SARP dependerá, em última instância, não da simples importação de plataformas ou componentes, mas da construção coordenada de uma base nacional de competências críticas. Isso implica reconhecer que tecnologias sensíveis não são entregues prontas: elas precisam ser absorvidas, recriadas, adaptadas e dominadas em seus diversos níveis, desde a engenharia de sensores até a lógica de decisão embarcada (Boulanin; Verbruggen, 2017). A articulação entre as esferas acadêmica, industrial e militar será, portanto, decisiva.

As seções seguintes aprofundarão a análise desses pontos, examinando os principais desafios técnicos e operacionais para a MB, os modelos internacionais de desenvolvimento e integração tecnológica, e as possíveis adaptações que podem ser feitas no contexto brasileiro. O objetivo será traçar um diagnóstico realista, porém orientado à ação, que permita vislumbrar caminhos estratégicos para superar as atuais fragilidades e consolidar uma capacidade nacional soberana no campo dos sistemas autônomos letais embarcados.

3.2 Viabilidade Técnica e Operacional

A integração de tecnologias autônomas letais em SARP voltados ao ambiente marítimo impõe desafios técnicos e operacionais que não se limitam à adaptação de plataformas originalmente concebidas para emprego terrestre ou continental. Para organizar a análise da viabilidade dessa integração, este estudo adota três eixos analíticos derivados das principais funções críticas envolvidas no emprego desses sistemas: a adaptação ao ambiente marítimo, a resiliência operacional em ambientes contestados e a operação com supervisão humana reduzida. O primeiro eixo abrange os requisitos físicos, ambientais e de integração com meios navais, como resistência à salinidade, operação embarcada e interoperabilidade com sistemas marítimos. O segundo eixo refere-se à capacidade do sistema de manter níveis aceitáveis de desempenho em cenários caracterizados por interferência eletromagnética, degradação de enlaces, negação de posicionamento e ameaças cibernéticas, típicos de ambientes operacionais contestáveis. O terceiro eixo trata das implicações técnicas e operacionais associadas à redução da intervenção humana direta, adotando-se a concepção de supervisão humana reduzida definida no item 1.1.5, correspondente ao modelo de "homem-no-loop", no qual decisões críticas permanecem sob responsabilidade humana, ainda que executadas com elevado grau de autonomia funcional pelos sistemas embarcados.

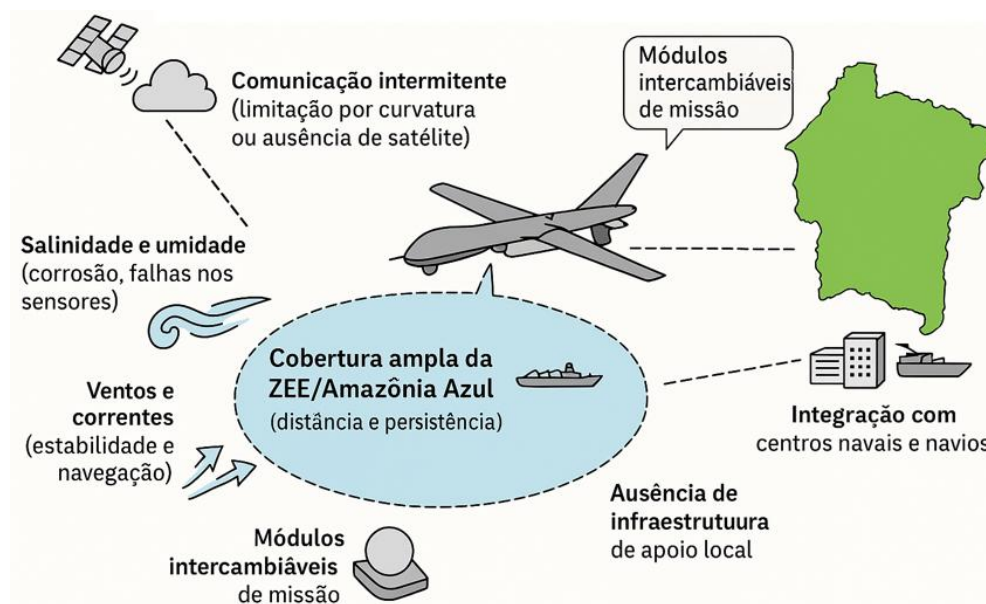
3.2.1 Adaptação ao Ambiente Marítimo e Reconfiguração Modular

A adaptação de SARP para operações em ambiente marítimo representa um desafio tecnológico complexo, com múltiplas dimensões que vão além da simples reconfiguração de drones terrestres. A vasta extensão da Zona Econômica Exclusiva brasileira e as especificidades do espaço marítimo da Amazônia Azul impõem requisitos técnicos adicionais, incluindo resistência à salinidade, operação sob variações bruscas de pressão e temperatura, umidade relativa elevada, ventos fortes e condições atmosféricas adversas. Essas exigências são incompatíveis com o emprego direto de plataformas originalmente projetadas para ambientes continentais, e exigem adaptações estruturais e funcionais profundas (EMA-415, 2024)

A Figura 15 sintetiza os principais desafios enfrentados por SARP ao operarem sobre o ambiente marítimo brasileiro. A complexidade da missão inclui fatores ambientais como salinidade, umidade e ventos fortes, bem como a ausência de pontos de apoio físico e as dificuldades logísticas inerentes à vigilância persistente da Amazônia Azul. Adicionalmente, a figura destaca a necessidade de módulos de missão intercambiáveis e da integração com centros

navais e plataformas de superfície, elementos fundamentais para garantir flexibilidade e interoperabilidade no contexto das operações navais.

Figura 15 - Desafios operacionais de SARP em ambiente marítimo



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado do EMA-415 (2024); NATO STO (2020).

As plataformas atualmente desenvolvidas no Brasil são majoritariamente otimizadas para emprego em ambiente terrestre e, embora demonstrem desempenho satisfatório em missões de vigilância e mapeamento, apresentam limitações relevantes para aplicação direta no ambiente marítimo.

A chamada tropicalização naval, entendida neste trabalho como o conjunto de adaptações técnicas necessárias para viabilizar a operação segura e confiável de plataformas aéreas em ambiente marítimo tropical, envolve modificações estruturais significativas. Essas adaptações incluem o emprego de ligas anticorrosivas na fuselagem, a adoção de padrões elevados de proteção IP (*Ingress Protection*) contra água e poeira, a blindagem eletromagnética de componentes sensíveis para mitigação de interferências externas e a vedação redundante de compartimentos eletrônicos expostos à salinidade, umidade elevada e variações térmicas típicas do ambiente oceânico.

Testes de compatibilidade ambiental baseados na norma MIL-STD-810H são essenciais para garantir o desempenho sob névoa salina, choque térmico e vibrações induzidas por decolagens embarcadas ou condições meteorológicas severas (UNITED STATES, 2019).

Além das exigências estruturais, a adequação ao ambiente marítimo impõe requisitos específicos em relação à carga útil embarcada. Sistemas aéreos que operam sobre o mar precisam integrar sensores de alta precisão voltados à detecção de alvos móveis em superfície.

Dentre os principais, destacam-se os radares de abertura sintética (SAR²⁶), capazes de gerar imagens em alta resolução mesmo sob baixa visibilidade, por meio da emissão de pulsos de micro-ondas e do processamento dos ecos refletidos. O emprego do Sistema de Identificação Automática²⁷ (AIS - *Automatic Identification System*) também se torna essencial, pois permite a recepção dos sinais emitidos por embarcações civis e militares, contribuindo para a identificação e rastreamento em tempo real de alvos de interesse (GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, 2025a)

A modularidade do sistema constitui um fator crítico na medida em que os SARP analisados neste trabalho são destinados a cumprir diferentes tarefas operacionais no ambiente marítimo, como vigilância persistente, reconhecimento e apoio à consciência situacional. Uma arquitetura modular permite ajustar a configuração da plataforma ao perfil da missão, viabilizando a integração seletiva de sensores e subsistemas conforme a necessidade operacional. Isso inclui, por exemplo, a substituição de cargas úteis entre sensores optrônicos multiespectrais, módulos de detecção passiva ou ativa, emissores de guerra eletrônica ou cargas úteis de uso restrito militar, favorecendo flexibilidade operacional e evolução incremental das capacidades.

Essa capacidade de reconfiguração rápida é fundamental não apenas para adequação operacional, mas também para manutenção em campo e modernização tecnológica. O MQ-9B SeaGuardian, por exemplo, foi concebido para suportar integração com sistemas C4ISR marítimos, sensores navais e enlaces criptografados compatíveis com os padrões STANAG (padrões de interoperabilidade da OTAN), demonstrando um modelo de interoperabilidade avançada (GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, 2025a).

A operação de SARP a partir de navios exige soluções específicas para lançamento e recuperação, especialmente em plataformas com restrições de espaço e movimento relativo do convés. Sistemas como o ScanEagle, desenvolvido pela Insitu (2025), operam sem trem de pouso convencional, utilizando lançamento por catapulta e recuperação por captura aérea baseada em cabos tensionados, o que permite sua operação a partir de navios de médio porte e

²⁶ SAR (Synthetic Aperture Radar): radar de abertura sintética, capaz de formar imagens mesmo sob nuvens ou sem luz.

²⁷ AIS (Automatic Identification System): sistema de transmissão automática de dados de identificação, posição e velocidade de embarcações, utilizado para navegação segura e monitoramento marítimo.

em condições adversas de mar. Segundo documentação técnica do fabricante, esse conceito de operação amplia a flexibilidade e a persistência das missões embarcadas, reduzindo a dependência de pistas ou áreas dedicadas para pouso (Insitu, 2025).

Além disso, novas soluções de recuperação vêm sendo pesquisadas. Revisões recentes sobre métodos de recuperação de UAVs de asa fixa sem pista destacam o emprego de redes de captura, sistemas de rope capture e outras soluções automatizadas voltadas à redução de impacto e à operação em espaços restritos. No contexto marítimo, também já foram demonstradas arquiteturas de recuperação autônoma de pequenos UAVs de asa fixa em plataformas móveis no mar, indicando o potencial de automação ampliada no ciclo de lançamento e recolhimento em navios de patrulha, fragatas e plataformas logísticas (Liu *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2020).

No que diz respeito ao apoio terrestre, a adaptação para o ambiente marítimo requer que as estações de controle e enlace sejam igualmente preparadas para condições extremas. Sistemas embarcados devem ser capazes de manter conectividade segura via comunicação via satélite (SATCOM) e rádio, operando em múltiplas bandas (L, Ku, X, que correspondem a diferentes faixas de frequência usadas em comunicações militares e satelitais), com criptografia robusta e redundância de enlaces. Contêineres modulares com climatização, blindagem e energia autônoma podem servir como postos avançados de controle em portos, ilhas oceânicas ou bases navais móveis.

A capacidade de operar com eficiência e segurança no ambiente marítimo também depende da superação de restrições tecnológicas impostas por fornecedores estrangeiros. Conforme advertiu Moreira (2013), o cerceamento tecnológico em áreas como sensores optrônicos, sistemas SAR e enlaces criptografados representa um risco estrutural à soberania operacional. A dependência de fornecedores externos torna os sistemas vulneráveis a interrupções logísticas, embargos ou inserção de vulnerabilidades intencionais em tempos de conflito.

Nesse sentido, a adaptação de SARP ao ambiente marítimo brasileiro está associada não apenas a requisitos físicos e operacionais, mas também à forma como o país lida com a dependência externa em componentes críticos. A literatura sobre cerceamento tecnológico indica que estratégias nacionais voltadas ao desenvolvimento, à substituição ou à certificação local de componentes sensíveis podem mitigar riscos de dependência excessiva, embora sua implementação dependa de decisões políticas, industriais e orçamentárias de longo prazo (Moreira, 2013).

3.2.2 Táticas de Resiliência e Operação em Ambiente Contestável

A crescente utilização de SARP em ambientes operacionais de alta complexidade exige o desenvolvimento de estratégias específicas de resiliência, sobretudo em contextos de contestação tecnológica ativa (ações adversárias de guerra eletrônica e cibernética). Operações em regiões sujeitas a interferência eletromagnética, guerra eletrônica e negação de acesso (A2/AD – Anti-Access/Area Denial) representam cenários cada vez mais prováveis em conflitos modernos. A inserção deste tópico no relatório técnico é fundamental para demonstrar que a viabilidade de adaptação de SARP com funções autônomas letais não depende apenas de adequações ambientais ou estruturais, mas também da robustez diante de ações hostis que visam degradar ou neutralizar suas capacidades.

O desenvolvimento de táticas de resiliência está diretamente relacionado à eficácia, segurança e autonomia dos sistemas empregados. A guerra eletrônica e a ciberdefesa são vetores centrais do combate contemporâneo, especialmente no domínio aéreo. Em ambientes onde canais de comando e controle (C2) podem ser bloqueados ou degradados por ações adversas, é essencial que os SARP sejam projetados com arquitetura modular e autônoma, capaz de manter a execução da missão mesmo com perda de comunicação externa. Isso inclui a integração de subsistemas com funcionamento independente, como navegação inercial, sensores embarcados e lógica decisória local, assegurando que a aeronave continue operando com segurança mesmo sob interferência eletrônica ou cibernética.

A guerra na Ucrânia tem servido como laboratório real para a análise dessas condições. Análises independentes, como as do Royal United Services Institute (RUSI), apontam que tanto drones comerciais quanto militares foram alvos frequentes de *jamming* (bloqueio de sinal de GPS), *spoofing* (falsificação de sinal) e ataques cibernéticos, levando à neutralização, desorientação ou até reversão da missão das aeronaves. Um relatório do RUSI mostra que a densidade dos sistemas de guerra eletrônica russos em regiões como Donetsk e Kherson provocou a perda de centenas de drones ucranianos por interferência intencional, evidenciando a vulnerabilidade de plataformas que não possuíam mecanismos autônomos de emergência ou navegação alternativa (RUSI, 2023)

Para os SARP brasileiros operarem com confiabilidade em cenários de contestação, será necessário incorporar soluções de navegação robustas, que combinem sistemas GNSS com unidades de navegação inercial (INS – *Inertial Navigation Systems*), além de sensores óticos integrados a algoritmos de localização visual (por exemplo, Visual SLAM). Essa abordagem

permite manter posicionamento e orientação mesmo na ausência de sinal satelital, mitigando os efeitos de interferência eletromagnética hostil (Qin *et al.*, 2018).

Adicionalmente, plataformas críticas devem ser capazes de alternar automaticamente para protocolos de missão pré-programada em caso de perda de enlace, operando em modo *fail-operational* (capacidade de continuar operando de forma segura mesmo após falha crítica) com retorno ao ponto de origem ou continuação segura da missão com base em critérios embarcados.

Além da redundância na navegação e da capacidade de execução autônoma de missão, os SARP precisam incorporar mecanismos de proteção cibernética embarcada. Essa proteção deve abranger desde a criptografia dos enlaces até a integridade dos sistemas de comando e controle internos, com autenticação de origem dos sinais, detecção de anomalias e isolamento de processos críticos. A literatura especializada tem alertado que, em conflitos recentes, diversos drones foram comprometidos por falhas na proteção de firmware ou ausência de protocolos de atualização seguros, permitindo que adversários interferissem nas instruções recebidas pelas aeronaves (Catuogno; Galdi, 2023).

A arquitetura de missão também deve prever a capacidade de operação em redes degradadas ou completamente negadas. Nesse contexto, estratégias baseadas em *edge computing*, nas quais parte do processamento da missão ocorre localmente na aeronave, reduzem a dependência de processamento remoto e enlaces contínuos. Essa abordagem aumenta a resiliência operacional, pois permite reações adaptativas mesmo sob *jamming* ou perda de comunicação (Janssen *et al.*, 2023). Em complemento, técnicas de cooperação em rede entre múltiplos drones, formando malhas dinâmicas de comunicação (*mesh networks*), vêm sendo exploradas como solução para garantir continuidade de missão em ambientes contestados (Bekmezci *et al.*, 2013).

Do ponto de vista tático, torna-se relevante que os protocolos operacionais prevejam trajetórias alternativas, abortamento seguro de missão, regras de engajamento embarcadas (ROE – *Rules of Engagement*) e atualização dinâmica dos objetivos com base na situação operacional. Em plataformas letais, esse aspecto adquire especial importância, pois a ausência de supervisão humana contínua pode gerar implicações estratégicas e éticas se o sistema não estiver preparado para lidar com incertezas sob ataque eletrônico. O reforço da robustez algorítmica e da segurança embarcada deve ser tratado, portanto, como uma prioridade de desenvolvimento.

A análise realizada neste relatório não identificou evidências, no escopo das fontes examinadas, de uma doutrina consolidada ou de infraestrutura dedicada especificamente à validação de SARP armados em cenários de guerra eletrônica e negação de acesso, o que sugere

limitações relevantes para a experimentação e a maturação dessas capacidades no contexto nacional.

A ausência de campos de provas com simulação de *jamming*, *spoofing* e ataques cibernéticos limita a capacidade nacional de certificar sistemas com padrão de robustez equivalente ao exigido por operações reais. Iniciativas isoladas em instituições como o IPqM ou o CTEEx ainda não constituem uma política estruturada de certificação técnica e tática em ambientes contestados.

Para que SARP empregados no contexto da MB possam evoluir, de forma incremental, em direção a capacidades autônomas letais mais robustas para operação em ambientes contestados, a análise realizada neste relatório sugere a necessidade de maior articulação entre pesquisa aplicada, engenharia de sistemas, doutrina operacional e instrumentos de fomento à inovação em defesa. Essa inferência decorre das limitações técnicas, institucionais e industriais identificadas ao longo do estudo, sem a pretensão de derivar modelos comparativos formais ou prescrições baseadas em experiências estrangeiras.

A análise desenvolvida neste relatório indica que, para funções como vigilância persistente, operação sob interferência eletromagnética e manutenção de enlaces de comando e controle, a resiliência em ambientes contestados constitui um requisito mínimo de viabilidade operacional, e não apenas um diferencial tecnológico.

3.2.3 Operação com Supervisão Humana Reduzida

A evolução dos sistemas de armas autônomas letais embarcados em plataformas aéreas tem deslocado gradualmente o foco da pesquisa e desenvolvimento para questões de comando, controle e decisão sob condições de autonomia crescente. Mais do que um avanço tecnológico, trata-se de um reposicionamento estratégico no qual o papel humano passa a ser redesenhado em favor de algoritmos embarcados com capacidade de avaliar cenários, priorizar alvos e executar ações críticas com base em parâmetros predefinidos. Para países que buscam ampliar sua autonomia operacional em missões de longa duração ou sob interferência adversária, como o Brasil, torna-se necessário discutir os limites e possibilidades da supervisão reduzida de SARP armados.

O conceito de “supervisão humana reduzida” não se limita a uma questão de ergonomia de controle remoto, mas representa uma mudança de paradigma no modelo de comando e controle (C2). Ele se refere à capacidade de uma plataforma autônoma de executar funções críticas como vigilância, rastreamento, reconhecimento e até engajamento, sem depender de

decisões humanas em tempo real, operando com base em lógica embarcada, perfis de ameaça e aprendizagem máquina. Conforme estabelece o Departamento de Defesa dos Estados Unidos em sua Diretiva 3000.09, sistemas autônomos devem ser projetados de forma a permitir que comandantes e operadores exerçam níveis apropriados de julgamento humano sobre o uso da força, característica essencial do modelo *human-on-the-loop* (U.S. Department of Defense, 2012).

A maioria dos sistemas atualmente em uso, como o MQ-9 Reaper e o Bayraktar TB2, ainda opera com um ser humano diretamente envolvido na decisão de uso da força letal (*human-in-the-loop*). No entanto, é crescente a tendência de delegar às máquinas funções intermediárias, como a identificação e priorização de alvos com base em algoritmos de aprendizado profundo (deep learning). Um exemplo frequentemente citado é o sistema israelense Harpy NG, capaz de permanecer em patrulhamento por horas e engajar alvos automaticamente dentro de parâmetros predefinidos (Boulanin; Verbruggen, 2017). Isso exige um novo tipo de doutrina, que defina limites precisos entre o que é delegável à máquina e o que requer validação humana.

No caso brasileiro, a adoção de SARP armados com supervisão reduzida deve considerar limitações técnicas de comunicação em tempo real e a dispersão geográfica das áreas de interesse estratégico. Em situações de latência elevada ou operação fora da linha de visada direta (*Beyond Visual Line of Sight* – BVLOS), o acionamento remoto pode se tornar impraticável. Nesses casos, seria necessário dotar o sistema de uma lógica de engajamento embarcada, com regras de exceção e zonas de engajamento previamente autorizadas, como discutido por Boulanin e Verbruggen (2017). Tais protocolos devem ser auditáveis, passíveis de simulação e inseridos em manuais operacionais adaptados ao Direito Internacional Humanitário (DIH) e à Estratégia Nacional de Defesa.

A implementação segura de operações autônomas com supervisão reduzida também requer investimentos em verificabilidade, testes sistemáticos e simulações em cenários realistas. Centros especializados, como o U.S. Army Futures Command e o Defence AI Centre do Reino Unido, têm investido em infraestruturas de validação técnica e doutrinária para sistemas de decisão autônoma (UNITED KINGDOM, 2022).

Essas estruturas realizam experimentações com protocolos de engajamento baseados em perfis de ameaça, com foco em interoperabilidade, ética operacional e responsabilização. A ausência de centros semelhantes no Brasil representa uma limitação à adoção segura e soberana de tais tecnologias, uma vez que o teste e validação de algoritmos críticos não podem depender de ambientes simulados estrangeiros nem de fornecedores internacionais.

Do ponto de vista tecnológico, avanços em sensores de percepção (como optrônicos multiespectrais), fusão de dados embarcada e arquitetura de comando distribuído têm ampliado a viabilidade da supervisão humana reduzida. Yanmaz *et al.* (2018) demonstram que, com redes de comunicação entre veículos e protocolos de coordenação adaptativos, torna-se possível delegar missões táticas a múltiplos SARP cooperativos com carga computacional distribuída. Isso reduz a dependência de estações remotas e permite que decisões operacionais ocorram em tempo real, mesmo com enlaces limitados. Ainda assim, a efetividade operacional depende de sistemas capazes de registrar e tornar compreensíveis os critérios usados em cada decisão, permitindo a reconstrução do processo que levou a determinada ação. Isso é essencial para garantir responsabilização e conformidade com as regras de engajamento.

Do ponto de vista doutrinário, a MB poderia iniciar a construção de protocolos táticos voltados à operação supervisionada de SARP armados em patrulha, usando zonas definidas de exceção e regras escalonadas de uso da força. A integração com sistemas de Comando e Controle (C2) navais, por meio de enlaces criptografados redundantes e missões parcialmente autônomas, pode representar um primeiro estágio viável de autonomia sob supervisão. O uso dual dessas capacidades também deve ser considerado, especialmente em operações de interceptação de embarcações ilegais, busca e salvamento, ou assistência humanitária em regiões de acesso limitado.

A viabilidade técnica da operação com supervisão humana reduzida está diretamente ligada à integração entre tecnologia embarcada, comunicação segura, doutrina responsiva e centros de validação autônomos. Embora os desafios sejam significativos, a ausência de avanço nessa direção pode limitar a efetividade dos SARP brasileiros frente a crescente complexidade dos ambientes operacionais no Atlântico Sul.

3.3 Adaptação de Modelos Existentes

Este subcapítulo analisa estratégias de desenvolvimento e integração de capacidades nacionais a partir da adaptação crítica de referências internacionais de SARP armados com funções autônomas, considerando o contexto tecnológico, operacional e institucional da MB.

Em vez de propor a aquisição direta de sistemas prontos ou o desenvolvimento de uma plataforma inteiramente nova desde o início, examina-se a viabilidade de incorporar, adaptar e nacionalizar tecnologias já consolidadas por meio de processos como engenharia reversa, tropicalização, reconfiguração modular e acordos seletivos de transferência tecnológica.

A análise considera aspectos como compatibilidade de sistemas, requisitos logísticos, arquitetura de comando e controle, restrições regulatórias e riscos de dependência crítica, com o objetivo de identificar caminhos realistas para o fortalecimento progressivo de capacidades autônomas no país, alinhadas às competências existentes da indústria, da academia e da doutrina militar brasileiras.

Diversos países têm recorrido à adaptação e evolução incremental de plataformas existentes como estratégia para acelerar a incorporação de tecnologias autônomas e reduzir custos de desenvolvimento. No caso da Turquia, o desenvolvimento do Bayraktar TB2 está associado a um processo gradual de fortalecimento da base industrial de defesa, com combinação inicial de componentes externos e progressiva nacionalização de subsistemas críticos. Na Coreia do Sul, programas como o KUS-FS refletem abordagens orientadas à adaptação de soluções consolidadas a requisitos operacionais domésticos. Israel, por sua vez, apresenta um ecossistema consolidado no desenvolvimento de sistemas não tripulados, com evolução contínua de plataformas como o Hermes 450 e o Hermes 900, além de sistemas de munição de patrulha como a família Harpy, com elevado grau de automação funcional.

A China seguiu trajetória própria no desenvolvimento da família Wing Loong, inserindo-se no segmento de aeronaves remotamente pilotadas de média altitude e longa permanência. O modelo Yilong, também denominado Wing Loong, apresenta forte similaridade de configuração e perfil de missão com plataformas norte-americanas, sendo descrito em relatório da U.S.-China Economic and Security Review Commission como uma aeronave que “se assemelha de perto” ao MQ-9 Reaper, embora com custos significativamente inferiores. As versões mais recentes, como o Wing Loong II, incorporam melhorias incrementais em autonomia, carga útil e integração de sensores, refletindo a evolução das capacidades industriais e tecnológicas chinesas (U.S.-CHINA ECONOMIC AND SECURITY REVIEW COMMISSION, 2013).

Esses casos indicam que a adaptação de modelos estrangeiros, combinada a processos de absorção tecnológica e nacionalização progressiva, pode constituir um caminho estratégico viável para o Brasil, desde que acompanhada por planejamento de longo prazo, coordenação institucional e fortalecimento da base científica e industrial de defesa.

3.3.1 Modelos Internacionais Relevantes e Estratégias de Adaptação

A adoção de plataformas armadas com níveis crescentes de autonomia tem sido conduzida por potências militares com estratégias distintas, combinando incentivos estatais, parcerias industriais e doutrinas de emprego específicas. Essa diversidade oferece ao Brasil um

conjunto de lições valiosas sobre caminhos possíveis de adaptação incremental e nacionalização progressiva. Três casos se destacam por sua relevância operacional e política: o MQ-9 Reaper (Estados Unidos), o Bayraktar TB2 (Turquia) e o Wing Loong II (China).

Nos Estados Unidos, o sistema MQ-9 Reaper, desenvolvido pela General Atomics Aeronautical Systems, representa uma evolução do MQ-1 Predator. Projetado como plataforma MALE (Medium-Altitude Long-Endurance), o Reaper possui autonomia de mais de 27 horas, capacidade de carga útil superior a 1.700 kg e integração com sistemas C4ISR de última geração (GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, 2025b). Um dos marcos tecnológicos recentes é o uso do pod Agile Condor, que embarca algoritmos de inteligência artificial voltados à detecção autônoma de ameaças com base em padrões visuais, aliviando a carga cognitiva do operador humano sem substituir sua decisão final (GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, 2025b). O uso operacional do Reaper mantém o conceito de *human-in-the-loop* para ações letais, seguindo as diretrizes éticas das Forças Armadas norte-americanas.

Já a Turquia consolidou uma trajetória independente ao desenvolver o Bayraktar TB2 por meio da empresa Baykar, com apoio decisivo do governo turco. O TB2 é uma aeronave MALE com autonomia superior a 27 horas, dotada de sensores eletro-ópticos, designador laser e capacidade de armamento guiado. Sua arquitetura modular permite integração com munições como a MAM-L, desenvolvida pela Roketsan, e enlaces táticos encriptados. Em conflitos recentes, Líbia, Síria, Nagorno-Karabakh e Ucrânia, o TB2 demonstrou eficácia em neutralizar sistemas de defesa aérea, ampliar o alcance de observação e modificar o equilíbrio tático em favor de forças menos equipadas (Péria-Peigné, 2023; ATLANTIC CONCIL, 2023). Segundo o SIPRI, até 2022 o modelo já havia sido exportado para mais de 20 países, sendo promovido como um vetor de soberania e como instrumento de diplomacia militar (SIPRI Arms Transfers Database, 2022).

A China seguiu um caminho próprio ao desenvolver o Wing Loong II, produzido pela Chengdu Aircraft Industry Group, como alternativa de menor custo a plataformas como o MQ-9 Reaper. A aeronave apresenta autonomia superior a 30 horas, carga útil aproximada de 480 kg e capacidade de operar com sensores eletro-ópticos, radar SAR e armamentos guiados. Estudos indicam que o desenvolvimento dessas plataformas está associado a estratégias de expansão da autonomia tecnológica e de inserção no mercado internacional de sistemas não tripulados, com menor dependência de fornecedores estrangeiros (CRS, 2022). A exportação do Wing Loong II para países como Egito, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos reforça a estratégia chinesa de competitividade geopolítica por meio da oferta de drones com menores restrições políticas e maior flexibilidade para transferência de tecnologia.

Apesar das diferenças nos modelos mencionados, há convergências que os tornam relevantes para o contexto brasileiro. Primeiramente, todos adotam arquitetura modular de cargas úteis e enlaces de missão, o que permite a customização de sensores, sistemas de comunicação e armamentos de acordo com a missão e o usuário. Em segundo lugar, embora contem com funções autônomas de navegação, vigilância e rastreamento, todos mantêm o acionamento letal sob supervisão humana, em alinhamento com os princípios do Direito Internacional Humanitário e com diretrizes doutrinárias das Forças Armadas dos respectivos países (Boulain; Verbruggen, 2017). Em terceiro lugar, o uso extensivo em conflitos reais forneceu feedback operacional e acelerou a curva de aprendizado, permitindo a evolução contínua das plataformas por meio de ciclos curtos de inovação.

Essas características indicam que a adaptação de modelos consolidados pode oferecer vantagens estratégicas ao Brasil, desde que acompanhada de um plano estruturado de nacionalização de subsistemas e desenvolvimento de doutrina. O estudo de Boulain e Verbruggen (2017), do SIPRI, destaca que a incorporação de armas autônomas em plataformas existentes exige, além de expertise técnica, uma governança robusta que assegure interoperabilidade, auditabilidade e controle sobre as decisões críticas dos sistemas.

No caso brasileiro, onde a vigilância da extensa Amazônia Azul exige plataformas de longo alcance e operação persistente, a adoção de modelos já validados em combate pode reduzir riscos de projeto e encurtar prazos de capacitação. Estratégias como aquisição com cláusulas de transferência tecnológica, desenvolvimento de sensores e softwares nacionais, além da integração com enlaces seguros, são alternativas realistas para mitigar a dependência externa. O uso de componentes COTS, como no modelo turco, aliado à nacionalização progressiva de módulos críticos, pode ser um caminho viável desde que articulado com metas industriais de longo prazo e supervisão institucional.

A observação desses modelos revela também a importância da articulação entre defesa, indústria e pesquisa. Nos Estados Unidos, o ecossistema militar-industrial permitiu a rápida transição de tecnologias do setor civil para aplicações militares. Na Turquia, a coordenação entre empresas como Baykar e Roketsan, apoiada por financiamento estatal, foi crucial para o sucesso do TB2. Já na China, a integração entre empresas estatais e centros de pesquisa em defesa permitiu o desenvolvimento de uma linha completa de UAVs armados com alto grau de autonomia industrial (Péria-Peigné, 2023).

Assim, a análise comparada dos casos norte-americano, turco e chinês fornece ao Brasil um conjunto de referências estratégicas para orientar a adaptação de modelos existentes, com ênfase em modularidade, controle soberano e inserção gradual da BID nacional. Os desafios

não são apenas tecnológicos, mas também institucionais, exigindo uma política coordenada de inovação dual use, certificação operacional e definição clara de requisitos de missão para os futuros SARP de uso militar com funções autônomas e letais.

3.3.2 O Caso Brasileiro: Nauru, Plataformas Nacionais e Limitações Tecnológicas

O desenvolvimento de SARP com capacidades autônomas e armadas requer não apenas a aquisição de plataformas prontas, mas também a análise crítica do potencial nacional para adaptação tecnológica. No Brasil, embora ainda não haja um sistema plenamente integrado de armas autônomas letais, já existem iniciativas que indicam capacidade técnica, industrial e institucional relevante. Este item examina o estado atual dessas iniciativas, com foco no Nauru 1000C e em outras plataformas com potencial de transição, considerando o contexto marítimo e a doutrina da MB.

A ênfase inicial no Nauru 1000C decorre de critérios analíticos adotados neste relatório, e não da exclusão das demais plataformas nacionais. O Nauru é tratado como referência principal por reunir, de forma mais clara, características técnicas diretamente relacionadas ao problema investigado, como arquitetura modular, lógica de missão programável, emprego dual com orientação militar e iniciativa formal de integração de armamento. As demais plataformas nacionais são analisadas ao longo do item como parte de um ecossistema tecnológico mais amplo, evidenciando competências complementares e diferentes estágios de maturidade, mas sem apresentar, até o momento, iniciativas equivalentes de transição formal para funções armadas autônomas.

O Nauru 1000C, desenvolvido pela empresa brasileira XMobots, é atualmente uma das plataformas nacionais mais promissoras. Trata-se de um SARP de médio porte com arquitetura modular, propulsão híbrida elétrica-combustão e capacidade de decolagem e pouso vertical (VTOL). Possui autonomia de até 10 horas, alcance operacional de 60 km e vocação original para missões do tipo ISTAR (*Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance*; XMobots, 2023). O sistema teve sua estreia oficial em ambiente operacional durante a Operação Perseu, no Exército Brasileiro, o maior treinamento militar da Força Terrestre em 2024 (XMobots, 2025a).

A Figura 16 ilustra a plataforma Nauru 1000C em sua configuração básica, permitindo visualizar os principais elementos estruturais que caracterizam sua aplicação em missões táticas e operacionais. A imagem complementa a descrição técnica ao oferecer uma referência visual direta da aeronave, facilitando a compreensão de seu porte, formato aerodinâmico e arranjos

funcionais compatíveis com sensores e cargas úteis modulares. Essa representação contribui para reforçar o entendimento do Nauru como uma base concreta para iniciativas nacionais de desenvolvimento e adaptação de SARP com potencial de emprego em ambientes marítimos.

Figura 16 - Nauru 1000C: SARP nacional com potencial de armamento autônomo.



Fonte: Xmobots (2025)

Embora não tenha sido concebido inicialmente para o emprego armado, o Nauru 1000C tornou-se objeto de um Memorando de Entendimento (MoU) entre a XMobots e a empresa europeia MBDA, firmado em 2023. O acordo prevê a integração do míssil leve Enforcer, ampliando o espectro de missões para incluir ações táticas ofensivas de curto alcance (MBDA, 2023). Essa iniciativa marca a primeira tentativa formal de nacionalizar uma plataforma armada com base tecnológica brasileira.

Apesar do avanço representado por essa parceria, o Nauru ainda enfrenta limitações significativas para ser considerado um SARP armado com capacidade plena de autonomia operacional. Não há registro de cooperação formal com a MB, embora a Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (EMA-415, 2024) destaque o interesse da Força Naval em sistemas embarcados modulares e interoperáveis com o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz), incluindo sensores, enlaces e softwares adaptáveis. A compatibilidade com o ambiente marítimo exige, no entanto, modificações estruturais relevantes, como reforço na vedação contra salinidade, redundância de enlaces C2 e blindagem eletrônica contra interferência eletromagnética, conforme apontado por estudos recentes sobre tropicalização de sistemas aéreos (UNITED STATES, 2019).

Além da adaptação física, os desafios tecnológicos incluem a ausência de sensores hiperspectrais produzidos nacionalmente, a escassez de enlaces criptografados com resistência a *jamming* e *spoofing*, a falta de certificações para inteligência artificial embarcada e a

inexistência de algoritmos de decisão operacionais testados em ambiente contestado (Moreira, 2013; UNIDIR, 2021). Tais lacunas exigem investimentos coordenados em P&D, infraestrutura de testes e atualização doutrinária, além de parcerias com centros de excelência acadêmicos e tecnológicos.

Outra limitação relevante é o cerceamento tecnológico implícito em acordos internacionais de fornecimento. Tecnologias sensíveis, como sensores infravermelhos de alta resolução, processadores para aprendizado de máquina embarcado e sistemas de navegação inercial de grau militar, estão frequentemente sujeitas a controles de exportação ou cláusulas de não-transferência. Esse cenário reforça a importância de políticas nacionais de incentivo à produção local, desenvolvimento de offsets inteligentes e diversificação de fornecedores internacionais (UNIDIR, 2021; PAX, 2023).

Apesar desses obstáculos, o Nauru 1000C representa um vetor estratégico de transição para o desenvolvimento de uma família nacional de SARP armados, desde que integrado a uma política de longo prazo de autonomia tecnológica. Sua arquitetura modular permite, em tese, a substituição progressiva de sensores, enlaces e subsistemas de controle por versões desenvolvidas localmente, seguindo práticas semelhantes às adotadas por países como Paquistão, Argélia e Cazaquistão em projetos de adaptação de drones originalmente importados (Boulain; Verbruggen, 2017; SIPRI, 2022).

Outras plataformas nacionais também merecem destaque. O UAV Falcão, desenvolvido pela Avibras em parceria com o DCTA, apresenta autonomia de 16 horas, estrutura robusta, capacidade para radar SAR e sensores EO/IR, e arquitetura compatível com modularidade e integração futura de cargas ofensivas. Apesar de ainda estar na fase de protótipo, o Falcão é citado como um dos projetos mais promissores do setor (Avibras, s. d.).

O Caçador, versão nacionalizada do Heron I israelense, é fruto da colaboração entre a IAI e a Avionics Services, em cooperação formal com a israelense IAI, que participou do desenvolvimento e transferência tecnológica, tendo recebido autorização para voos em espaço aéreo não segregado pela ANAC. Com autonomia superior a 30 horas e 250 kg de carga útil, o sistema é tecnicamente qualificado para missões armadas sob supervisão humana (Avionics Services, s. d.). A plataforma foi empregada em campanhas experimentais conduzidas pela Força Aérea Brasileira.

O projeto Harpia, fruto da colaboração entre Embraer, AEL Sistemas e IAI, foi descontinuado após avanços iniciais na integração de enlaces de dados e comunicações via satélite, tendo seu cancelamento sido noticiado pela agência Reuters em 2016. Apesar da

suspensão do programa, acumulou conhecimento relevante em integração de sensores e interoperabilidade com sistemas nacionais (Vasconcelos, 2021).

O Atobá XR, desenvolvido pela Stella Tecnologia com apoio da Finep, oferece até 35 horas de autonomia, sensores de abertura sintética (radar AESA) e capacidade de integração modular. Embora voltado inicialmente a missões de reconhecimento, seu design permite futuras adaptações armadas com intervenções limitadas no projeto (Stella Tecnologia, 2024).

O ScanEagle, embora importado da Insitu/Boeing, tem sido utilizado pela MB em missões embarcadas de vigilância. A familiaridade operacional adquirida com o sistema, mesmo sem transferência de tecnologia, contribui para a doutrinação da força e para a definição de requisitos futuros de plataformas armadas navais, razão pela qual a referência à Insitu é pertinente no contexto deste estudo (Defesa Aérea & Naval, 2021).

Para fins deste relatório, o potencial de adaptação refere-se à capacidade técnica e arquitetônica de uma plataforma aérea nacional incorporar, de forma incremental, funções armadas e graus crescentes de autonomia, considerando variáveis como porte da aeronave, capacidade de carga útil, arquitetura modular, autonomia energética, integração de sensores, enlaces de comando e controle e histórico de emprego operacional ou experimental. A seleção das plataformas apresentadas no Quadro 9 prioriza sistemas de médio porte com vocação para missões persistentes, compatíveis com o ambiente marítimo e com possibilidade realista de evolução para configurações armadas, não se destinando a esgotar todas as iniciativas nacionais existentes.

Para sintetizar as iniciativas nacionais mais relevantes, o Quadro 9 apresenta uma comparação das principais plataformas brasileiras com potencial de adaptação para funções armadas e autônomas. A sistematização permite visualizar, de forma comparativa, o estágio de maturidade, o potencial de adaptação e as parcerias institucionais associadas a cada modelo.

Quadro 9 - Comparação das plataformas brasileiras com potencial de adaptação

Plataforma	Status atual	Potencial de adaptação	Referências
Nauru 1000C	Sistema em operação pelo Exército Brasileiro, com emprego em missões ISTAR	Elevado potencial de integração de funções autônomas em navegação, vigilância e apoio à decisão, condicionado à evolução de sensores e processamento embarcado	XMobots s.d.
Falcão	Plataforma desenvolvida pela Avibras, com testes realizados e sem evidência de produção em série	Potencial moderado, dependente de continuidade do programa e maturidade industrial	Avibras, s.d.; Pesquisa FAPESP, s. d.
Caçador	Programa desenvolvido em parceria com a IAI, com demonstrações e voos iniciais, sem consolidação operacional	Potencial elevado do ponto de vista tecnológico, limitado por dependência externa e descontinuidade do programa	IAI, 2016

Plataforma	Status atual	Potencial de adaptação	Referências
Harpia	Projeto descontinuado após encerramento da joint venture entre Embraer e parceiros	Potencial interrompido, evidenciando limitações estruturais e institucionais	Reuters, 2016
Atobá XR	Plataforma apresentada recentemente pela indústria nacional, com estágio inicial de desenvolvimento	Potencial elevado, especialmente para aplicações ISR e vigilância marítima, condicionado à maturação tecnológica	Stella Tecnologia, s. d.; Tecnodefesa, 2024
ScanEagle	Sistema em operação na Marinha do Brasil, empregado em vigilância marítima	Potencial limitado à incorporação incremental de autonomia, devido à arquitetura proprietária e restrições tecnológicas	Marinha do Brasil. 2024; Agência Marinha de Notícias, 2022

Fonte: Elaborado pelo autor a partir das referências contantes no quadro

Plataformas de menor porte, voltadas a reconhecimento aproximado ou emprego tático de curto alcance, embora relevantes do ponto de vista doutrinário e de aprendizado operacional, não foram incluídas nesta comparação por não apresentarem, no estágio atual, características compatíveis com a integração de cargas letais ou com operações persistentes de médio e longo alcance no ambiente marítimo.

A análise do conjunto de plataformas nacionais revela que o Brasil já dispõe de ativos industriais e tecnológicos que, embora ainda fragmentados, podem ser mobilizados em direção a um sistema nacional de SARP armados e autônomos, desde que respeitados critérios de porte, modularidade e viabilidade de integração. O Nauru 1000C lidera essa tendência como o primeiro modelo nacional com iniciativa formal de armamento, mas projetos como o Falcão, o Caçador e o Atobá XR evidenciam uma base mais ampla de competências acumuladas. A transição para sistemas armados plenamente autônomos dependerá, no entanto, de ações coordenadas nas áreas de política industrial, certificação, desenvolvimento tecnológico e articulação da tríplice hélice.

3.3.3 Desafios Ambientais e Doutrinários para a Adaptação Operacional

A adaptação de SARP com funções autônomas letais ao ambiente marítimo brasileiro implica uma série de desafios estruturais que transcendem a simples replicação de modelos internacionais. As condições específicas da Amazônia Azul, aliadas às lacunas regulatórias e à ausência de doutrina nacional consolidada para o uso de armas autônomas, tornam esse processo particularmente complexo. Neste item, são analisadas as variáveis ambientais, normativas, logísticas e doutrinárias que influenciam a viabilidade da adaptação operacional desses sistemas para o contexto da MB.

Do ponto de vista ambiental, a operação em áreas oceânicas impõe exigências severas às plataformas aéreas. As condições de salinidade elevada, umidade constante, variações térmicas abruptas e ocorrência de tempestades tropicais afetam diretamente a durabilidade e o desempenho de sensores, enlaces de dados e estruturas de aeronaves. Além disso, a exposição a zonas de interferência eletromagnética, seja por causas naturais ou por ações de guerra eletrônica, exige sistemas com alta tolerância a falhas e proteção reforçada (UNITED STATES, 2019).

Estudos sobre o uso do MQ-9 Reaper em cenários marítimos apontam a necessidade de reforços estruturais, selagem avançada de componentes eletrônicos, redundância de canais de comunicação e integração de sensores com sistemas de diagnóstico autônomo para monitoramento de falhas (USAF, 2022). A aplicação desses aprendizados à realidade brasileira requer uma política consistente de tropicalização de plataformas, inclusive com validação em centros de ensaio e teste ambiental específicos para o domínio marítimo, ainda inexistentes no Brasil.

Além das condições ambientais, a infraestrutura embarcada da MB também impõe desafios. O lançamento, o controle e a recuperação de SARP a partir de navios demandam soluções de integração que conciliem limitações de espaço, vibração e interferência com os padrões exigidos por aeronaves autônomas. O uso de catapultas portáteis, redes de recuperação ou pistas curtas embarcadas deve ser compatibilizado com as características das plataformas navais brasileiras, como navios-patrolha oceânicos, corvetas e navios de apoio logístico.

No campo normativo, o Brasil ainda não dispõe de legislação específica para o uso de SARP armados em operações militares, especialmente em ambiente marítimo. O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E nº 94), emitido pela ANAC em 2023, trata majoritariamente da operação civil de aeronaves remotamente pilotadas, estabelecendo que os voos militares estão sujeitos a regras específicas determinadas pelo DECEA. No entanto, o documento não aborda questões relativas a drones armados, tampouco estabelece protocolos para operação autônoma em zonas de interesse militar.

A ausência de diretrizes normativas específicas para o emprego de SARP com funções autônomas letais não impede, por si só, a experimentação inicial dessas capacidades no âmbito militar. Em fases preliminares de desenvolvimento, a prática tende a preceder a formalização doutrinária, permitindo a validação técnica, operacional e organizacional de novos sistemas antes de sua consolidação normativa.

Contudo, à medida que essas capacidades evoluem para níveis mais elevados de maturidade tecnológica e de potencial emprego operacional, a inexistência de marcos

doutrinários e normativos mínimos reduz a previsibilidade institucional e amplia os riscos jurídicos e políticos associados ao uso da força letal por sistemas não tripulados. Nesse estágio, a definição de responsabilidades, limites de delegação de comando e critérios de emprego torna-se relevante não para restringir a inovação, mas para conferir legitimidade, controle e segurança às decisões operacionais.

A experiência internacional indica que esses marcos tendem a emergir de forma incremental e reativa, em resposta à consolidação prática das capacidades, e não como condição prévia ao seu desenvolvimento. Relatórios de organismos internacionais apontam que essa trajetória gradual é comum no campo das tecnologias autônomas militares, especialmente diante da ausência de consenso internacional sobre definições e limites regulatórios (UNIDIR, 2021).

No caso brasileiro, embora a Marinha do Brasil ainda não disponha de normativos específicos voltados ao emprego de SARP com funções autônomas letais, documentos estratégicos como o Livro Branco de Defesa Nacional (BRASIL, 2025) e a Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (EMA-415, 2024) reconhecem a importância crescente de sistemas não tripulados, inteligência artificial e guerra em rede. Esses documentos sinalizam direções estratégicas, ainda que não estabeleçam diretrizes operacionais detalhadas para delegação de comando, uso de força automatizado ou responsabilização em caso de falhas.

Parte da literatura internacional, especialmente no âmbito de organismos humanitários e de estudos sobre governança do uso da força, tem discutido princípios orientadores para o emprego de sistemas com supervisão humana reduzida, como a presença de supervisão humana qualificada, a possibilidade de intervenção ou veto e a atribuição clara de responsabilidade por ações letais. Esses elementos são apresentados, contudo, como referenciais normativos em debate, e não como modelos operacionais consolidados ou pré-requisitos técnicos para o desenvolvimento de capacidades autônomas letais.

Estudos nesse campo reconhecem que tais princípios emergem, em geral, de preocupações jurídicas, éticas e políticas associadas ao emprego da força, e tendem a ser formulados de maneira incremental, em resposta à maturação tecnológica e ao uso prático dos sistemas, e não como condição prévia à sua concepção ou experimentação. Nesse sentido, a incorporação desses referenciais deve considerar custos, impactos sobre a flexibilidade operacional e o estágio de desenvolvimento das capacidades analisadas, evitando a transposição acrítica de modelos regulatórios civis ou de segurança do trabalho para o contexto militar (Boulanin; Verbruggen, 2017; CICV, 2021).

A operação de SARP armados com graus crescentes de autonomia impõe demandas progressivas sobre a infraestrutura terrestre e embarcada de comando e controle, cuja complexidade tende a aumentar à medida que essas capacidades evoluem. Em fases iniciais de desenvolvimento e experimentação, soluções de escopo limitado e arquiteturas existentes podem ser empregadas para viabilizar testes, aprendizado operacional e validação técnica.

À medida que se avance para níveis mais elevados de autonomia e integração, tornam-se relevantes requisitos como enlaces criptografados com maior resiliência, capacidade de integração com sistemas de monitoramento existentes, como o SisGAAz e o SIC2Naval²⁸, e protocolos interoperáveis com sensores, radares e unidades de superfície. No contexto atual, a Marinha do Brasil encontra-se em processo de modernização dessas capacidades, ainda sem um programa específico voltado à integração de sistemas letais autônomos no ambiente naval, o que indica que eventuais avanços deverão, inicialmente, apoiar-se em abordagens incrementais, experimentais e de escopo controlado, compatíveis com práticas de prototipação e aprendizado progressivo (MARINHA DO BRASIL, 2024).

Além das barreiras técnicas e normativas, há o desafio institucional da formação de pessoal qualificado. A introdução de SARP com maior grau de autonomia demanda novos perfis profissionais, como operadores de missão com conhecimento em inteligência artificial, engenheiros de sistemas com domínio de protocolos embarcados e oficiais capacitados em doutrina de engajamento automatizado. A inexistência de centros nacionais voltados à capacitação operacional e jurídica no uso de armas autônomas representa, portanto, uma barreira adicional à adaptação.

O arcabouço jurídico internacional impõe limites inegociáveis ao emprego de armas letais, mesmo quando parcialmente automatizadas. Os princípios do Direito Internacional Humanitário, distinção, proporcionalidade e precaução, devem ser observados de forma rigorosa. Para tanto, é imprescindível que a Marinha disponha de mecanismos de revisão de missão, logs auditáveis de decisões algorítmicas e capacidade de intervenção humana em todas as fases críticas do ciclo de operação. Essa necessidade é reforçada por relatórios da ONU e do Comitê Internacional da Cruz Vermelha, que alertam para os riscos de sistemas sem supervisão clara e atribuição de responsabilidade jurídica (CICV, 2021; UNIDIR, 2021).

Os desafios à adaptação operacional de SARP armados autônomos no contexto da MB não se restringem ao domínio da engenharia. Eles exigem um esforço articulado entre os setores

²⁸ Sistema Integrado de Comando e Controle Naval da Marinha do Brasil, destinado à integração, visualização e apoio ao processo decisório a partir de informações provenientes de sensores, meios navais, aéreos e costeiros.

técnico, jurídico, normativo e doutrinário, com investimentos em infraestrutura, capacitação, regulamentação e validação experimental. A viabilidade dessa transição dependerá, sobretudo, da capacidade institucional do país em articular inovação tecnológica com responsabilidade estratégica.

3.3.4 Caminho Estratégico: Capacitação Nacional e Autonomia Gradual

O desenvolvimento e a adoção de SARP com capacidades letais autônomas no Brasil exigem não apenas a aquisição de tecnologias de ponta, mas, sobretudo, a construção de uma estratégia nacional integrada. Essa estratégia deve articular os pilares da capacitação industrial, nacionalização tecnológica, adequação regulatória e desenvolvimento doutrinário, de modo a permitir um avanço gradual, seguro e soberano. No contexto marítimo, esse processo ganha complexidade adicional, dadas as exigências operacionais do ambiente oceânico e os requisitos de interoperabilidade com sistemas navais existentes.

A primeira dimensão crítica para esse caminho estratégico é o fortalecimento da BID. Essa base ainda carece de políticas públicas de longo prazo voltadas especificamente para tecnologias sensíveis como sensores hiperespectrais, enlaces criptografados resistentes a interferência, algoritmos embarcados para tomada de decisão em tempo real e fusão de dados multissensores. A Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (EMA-415, 2024) reconhece essas lacunas e recomenda a promoção de parcerias estratégicas entre governo, universidades e empresas, com ênfase na criação de polos de excelência em inteligência artificial, guerra eletrônica e robótica.

Modelos de transferência de tecnologia baseados em mecanismos de offset, como os utilizados pela Turquia na produção do Bayraktar TB2 ou pela Coreia do Sul no desenvolvimento do KUS-FS, mostram-se viáveis desde que acompanhados de cláusulas robustas de propriedade intelectual, sigilo industrial e nacionalização progressiva. Esses modelos podem servir como referência para o Brasil, especialmente em projetos futuros de aquisição de sistemas estrangeiros com vistas à integração de componentes locais e desenvolvimento de variantes próprias (ATLANTIC COUNCIL, 2023).

Experiências nacionais recentes indicam que esse caminho já começou a ser trilhado, ainda que de forma incipiente. O Memorando de Entendimento firmado entre a XMobots e a MBDA para avaliar a integração do míssil Enforcer ao Nauru 1000C constitui um marco importante. Da mesma forma, o projeto Caçador, baseado no Heron 1 israelense, mas adaptado

pela empresa Avionics Services com apoio da AEL Sistemas, demonstra que parcerias com transferência de tecnologia são possíveis, mesmo em áreas sensíveis como sensoriamento eletro-óptico e enlaces de comunicação.

A construção de uma trajetória nacional voltada à autonomia tecnológica exige não apenas avanços técnicos, mas também o estabelecimento de um marco regulatório específico para a operação de SARP armados. O RBAC-E nº 94 (ANAC, 2023), que trata da operação de aeronaves remotamente pilotadas em ambiente civil, não contempla as especificidades de sistemas militares letais com funções autônomas. Essa lacuna regulatória compromete a previsibilidade jurídica e limita a formulação de programas institucionais consistentes.

É essencial que o Ministério da Defesa, em conjunto com órgãos como o DECEA e a ANAC, elabore um regulamento técnico-militar específico para SARP armados, que inclua diretrizes sobre níveis de autonomia, requisitos de certificação de software de missão, protocolos de validação de IA embarcada e regras de engajamento. Experiências internacionais, como o *Joint Artificial Intelligence Center* (JAIC) do Departamento de Defesa dos EUA e as recomendações do UNIDIR, indicam que a introdução progressiva de autonomia, com mecanismos de supervisão humana ativa e logs auditáveis, é juridicamente defensável e tecnicamente segura (UNIDIR, 2021; USAF, 2022).

Em paralelo ao avanço regulatório, é necessário o desenvolvimento de uma doutrina operacional nacional para o uso de SARP armados, especialmente em ambiente marítimo. Essa doutrina deve definir com clareza os parâmetros de uso da força sob diferentes níveis de autonomia: desde o controle direto por operador (“*human-in-the-loop*”), passando pela supervisão (“*human-on-the-loop*”), até as missões predefinidas com regras de exceção. Essa codificação doutrinária deve estar alinhada ao Direito Internacional Humanitário, garantindo a observância de princípios como distinção, proporcionalidade e responsabilidade atribuída.

Além disso, o treinamento de pessoal torna-se um fator central para a viabilidade dessa estratégia. A formação de operadores, engenheiros de missão e técnicos de manutenção deve incorporar novas competências, como segurança cibernética embarcada, manipulação de sensores inteligentes, tomada de decisão autônoma assistida por IA e análise de dados em tempo real. O fortalecimento de centros de excelência, como o IPqM, o Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e as universidades parceiras, é vital para internalizar esse conhecimento. A inexistência de centros dedicados à simulação, validação e adestramento de SARP armados limita a capacidade nacional de absorver tecnologias autônomas sensíveis de forma segura.

Outro aspecto central é a adequação da infraestrutura operacional e logística às exigências dos SARP armados. Isso inclui a modernização de centros de comando e controle (C2) navais e terrestres, compatíveis com enlaces seguros, de baixa latência e alta resiliência. Tais centros devem ser integrados a sistemas já existentes, como o SisGAAz, e capazes de operar em regime de interoperabilidade com plataformas de vigilância, inteligência e ataque. A doutrina C4ISR precisa ser incorporada ao cotidiano operacional da MB, com ênfase em missões marítimas autônomas e coordenação entre unidades de superfície, aéreas e costeiras.

O emprego de sistemas como o MQ-9 Reaper em cenários de guerra eletrônica, ambientes de difícil acesso ou operações embarcadas em porta-aviões demonstra que a eficácia operacional dos SARP armados está diretamente relacionada à robustez da rede tática de apoio. Enlaces criptografados por satélite (SATCOM), redundância de canais, software de missão dinâmico e doutrina de comando distribuído são pré-requisitos já observados em FA de países como Estados Unidos, Israel e Reino Unido (GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, 2025b).

No cenário brasileiro, a análise desenvolvida neste relatório indica que a evolução para capacidades autônomas letais em SARP tende a ocorrer de forma incremental, em razão das limitações técnicas, institucionais e industriais identificadas ao longo do estudo, como restrições energéticas, dependência de componentes críticos, ausência de certificação específica e fragmentação da articulação entre os atores envolvidos. Nesse contexto, trajetórias que iniciem com sistemas sob supervisão humana integral e funções autônomas restritas mostraram-se mais compatíveis com a realidade institucional nacional, permitindo aprendizado operacional, validação tecnológica e redução de riscos antes da ampliação dos níveis de autonomia.

Essa evolução progressiva pode ser balizada por metas de curto, médio e longo prazo, associadas a avaliações periódicas de maturidade tecnológica, riscos de dependência externa e aderência às diretrizes da Política Nacional de Defesa e da Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha. Mais do que uma aquisição pontual, a consolidação dessas capacidades depende da continuidade de esforços de desenvolvimento, experimentação e integração institucional, capazes de transformar iniciativas isoladas em capacidades operacionais sustentáveis no ambiente marítimo.

3.4 Conclusão do Capítulo 3

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo evidenciou que o Brasil possui, apesar de limitações estruturais e tecnológicas, condições reais para trilhar um caminho gradual rumo à integração de sistemas autônomos armados em plataformas aéreas nacionais, particularmente no contexto da Marinha. A partir do diagnóstico de capacidades, desafios e modelos de referência, torna-se possível traçar estratégias concretas de fortalecimento da soberania tecnológica e operacional.

Em relação à percepção institucional e à articulação entre governo, academia e indústria (item 3.1), observou-se um cenário ainda fragmentado, mas com pontos de convergência importantes. Há consenso entre atores da Tríplice Hélice sobre a importância de tecnologias autônomas para a defesa nacional, embora persistam gargalos como a falta de coordenação interinstitucional, a escassez de investimentos em pesquisa dual e a necessidade de ampliar a formação de especialistas em áreas críticas como inteligência artificial, sistemas embarcados e sensores. Esses achados respondem diretamente ao objetivo de identificar entraves institucionais e caminhos de articulação intersetorial.

A análise da viabilidade técnica e operacional (item 3.2) mostrou que o domínio nacional de sistemas autônomos armados depende da superação de restrições materiais (acesso a sensores de alta complexidade, enlaces de dados, módulos de IA embarcada), mas também de barreiras normativas e doutrinárias. O ambiente marítimo brasileiro impõe exigências específicas de robustez, autonomia energética e resiliência operacional que não são plenamente atendidas pelas plataformas atuais. Essa discussão contribui para avaliar a maturidade tecnológica nacional e analisar os impactos da autonomia energética sobre missões marítimas autônomas, objetivos centrais deste estudo.

No item 3.3, demonstrou-se que a adaptação de modelos estrangeiros, associada a um plano nacional de capacitação tecnológica e incorporação progressiva de componentes autônomos, é uma alternativa viável. O estudo de sistemas internacionais (MQ-9 Reaper, Bayraktar TB2, Wing Loong II) indicou que modularidade, supervisão humana e trajetórias incrementais são elementos centrais para o sucesso da integração. A comparação com diversas plataformas brasileiras, como o Nauru 1000C, Falcão, Caçador, Harpia e Atobá XR, confirmou que o país dispõe de ativos tecnológicos relevantes que podem ser aproveitados em um projeto de autonomia orientado por marcos regulatórios, doutrina específica e articulação com programas já existentes, como o SisGAAz. Essa análise contribui diretamente para avaliar a viabilidade de adaptação de modelos internacionais ao contexto da MB.

Dessa forma, constata-se que os quatro objetivos específicos inicialmente propostos foram contemplados ao longo do capítulo. A hipótese central deste relatório, de que o Brasil possui condições institucionais, industriais e operacionais para integrar, com supervisão, tecnologias autônomas letais em SARP no contexto marítimo, encontra respaldo nos dados levantados até aqui. Contudo, o êxito dessa trajetória dependerá menos da importação de soluções prontas e mais da capacidade nacional de coordenação, planejamento e decisão estratégica sobre o uso e o desenvolvimento de tais tecnologias.

O capítulo seguinte aprofundará essa reflexão por meio da análise das entrevistas realizadas com representantes da Tríplice Hélice, buscando compreender as percepções, expectativas e limites concretos do desenvolvimento autônomo de sistemas armados no Brasil.

4 CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo analisar criticamente os dados obtidos por meio das entrevistas realizadas com representantes dos setores Governo/FA, BID e Academia, à luz dos achados dos capítulos anteriores. A proposta é identificar convergências, assimetrias e lacunas na percepção dos atores estratégicos sobre o desenvolvimento e a integração de tecnologias autônomas letais em SARP, considerando os desafios técnicos, operacionais, institucionais e normativos. Para tanto, os dados coletados foram organizados e interpretados de acordo com categorias analíticas definidas previamente no projeto de pesquisa, permitindo uma leitura estruturada das posições expressas por setor da Tríplice Hélice.

4.1 Considerações Metodológicas

A presente etapa da pesquisa tem como objetivo sistematizar e interpretar os dados coletados por meio de entrevistas, visando complementar e validar as análises apresentadas nos capítulos anteriores. Optou-se por uma abordagem qualitativa, com base em entrevistas semiestruturadas, por se tratar de uma temática ainda pouco explorada no contexto brasileiro e altamente dependente de percepções institucionais, técnicas e políticas de atores estratégicos. O método qualitativo permite capturar nuances, interpretações e experiências dos participantes que dificilmente seriam acessadas por instrumentos quantitativos.

As entrevistas foram estruturadas com base no modelo da Tríplice Hélice, correspondendo aos três setores diretamente implicados no desenvolvimento e integração de tecnologias autônomas letais em SARP. Para cada setor foi elaborado um conjunto específico de perguntas, com ênfase nas contribuições potenciais de cada esfera, nas percepções de viabilidade e nos obstáculos à implementação dessas tecnologias. Os roteiros completos de perguntas utilizadas nas entrevistas encontram-se no Apêndice deste trabalho, organizados respectivamente para os setores Governo/FA, Indústria e Academia.

Foram realizadas 15 entrevistas: 7 com representantes do setor Governo/FA, 5 com representantes da Academia e 3 com representantes da Indústria. Ao todo, foram contatados 26 representantes, mas apenas 15 aceitaram participar e efetivamente responderam às entrevistas, refletindo tanto a disponibilidade dos atores quanto as restrições de tempo e acesso características do tema. O número de entrevistados por setor não seguiu uma amostragem estatística, mas a lógica da saturação teórica e da disponibilidade de fontes qualificadas. A seleção dos participantes foi orientada por critérios de expertise, cargo ocupado, envolvimento

com projetos de defesa, participação em eventos ou indicação por pares. Em todos os casos, o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) foi enviado previamente, com autorização para uso acadêmico dos conteúdos.

As entrevistas foram conduzidas presencialmente, por videoconferência ou por e-mail, conforme a disponibilidade dos participantes. Nos casos em que as respostas foram encaminhadas por escrito, foi garantida a possibilidade de esclarecimento posterior por parte do pesquisador. Todas as respostas foram organizadas por setor e codificadas com identificadores genéricos do tipo "Entrevistado 3 – Governo" ou "Entrevistado 2 – Academia", a fim de preservar o anonimato dos participantes e assegurar a confidencialidade das informações.

A técnica de análise utilizada foi a análise temática, conforme proposta por Bardin (2011), complementada por elementos de análise categorial inspirados em Yin (2016) e Stake (1995). As falas foram organizadas em quatro eixos de percepção: interesse estratégico, capacidades técnicas, articulação institucional e riscos percebidos. Esses eixos orientam a estrutura do item 4.2 deste capítulo e permitiram identificar padrões, convergências e divergências entre os setores da Tríplice Hélice.

4.2 Eixos de Percepção: Interesses, Capacidades e Riscos

A fim de sistematizar as informações obtidas nas entrevistas e facilitar a comparação entre os diferentes setores da Tríplice Hélice, a análise foi estruturada em quatro eixos temáticos recorrentes nas falas dos participantes: (1) percepção e interesse estratégico; (2) capacidades técnicas e de recursos humanos; (3) articulação institucional e cooperação; e (4) riscos, desafios e barreiras. Cada subitem aborda como os três setores compreendem esses temas, permitindo identificar padrões de alinhamento, divergências conceituais, obstáculos práticos e percepções sobre o papel de cada ator na construção da capacidade nacional de emprego de tecnologias letais autônomas.

4.2.1 Percepção e Interesse Estratégico

A análise das entrevistas revela que os três setores da Tríplice Hélice reconhecem, em diferentes graus, a relevância estratégica dos SARP com capacidades autônomas letais para a defesa nacional. Entretanto, esse reconhecimento não se traduz, no momento, em uma

prioridade política ou institucional clara, sendo limitado por barreiras regulatórias, financeiras e organizacionais.

No setor Governo/FA, a percepção predominante é de que os SARP com funções autônomas letais representam uma oportunidade estratégica para ampliar a Consciência Situacional Marítima (CSM), aumentar a capacidade de dissuasão e reduzir riscos humanos em operações de vigilância e ataque. Um entrevistado afirmou que tais tecnologias são vistas com "potencial para ampliar a vigilância e a capacidade de resposta a ameaças, desde que respeitados os marcos normativos". Outro reconheceu que "no médio e longo prazo, prevê-se o uso de SARP armados, desde enxames de categoria 0 e 1 com explosivos até modelos mais sofisticados [...] com mísseis e foguetes, para operações de esclarecimento armado e ataque".

Apesar disso, vários entrevistados apontaram a inexistência de planos consolidados para o emprego de SARP armados, letalidade autônoma ou mesmo doutrina que regule seu uso. Um dos depoentes destacou que "a MB passou a discutir a aquisição de defesas contra SARP, mas [...] não se divulgou ou se solicitou estudos para o emprego de SARP pela MB, autônomo menos ainda". Outro afirmou que "não há uma pronta resposta para a percepção institucional", embora reconheça que "cedo ou tarde elas [as ARP letais] vão ter que fazer parte disso".

Algumas declarações também indicam uma visão pragmática e estratégica do emprego desses sistemas: um dos entrevistados ressalta que, apesar dos custos e desafios operacionais, "o emprego de armamentos em SARP para uma resposta rápida em um cenário de conflito" já é objeto de desenvolvimento, como no caso do Nauru 1000 da XMobots. Outro avaliou que os drones armados, devido à sua alta dualidade, podem vir a desempenhar funções também na segurança pública, o que ampliaria a sustentabilidade econômica dos projetos. Um entrevistado ainda destacou que "a BID apresenta elevado potencial de multiplicação" e que o Brasil precisa "desenvolver determinadas tecnologias críticas de forma autônoma", como armamento, mísseis e torpedos.

Entre os entrevistados do setor acadêmico, predomina a percepção de que as tecnologias letais autônomas constituem um tema relevante para a soberania nacional e para a inovação em defesa. No entanto, segundo os próprios entrevistados, não há conhecimento consolidado sobre a existência de projetos especificamente voltados a esse tema em universidades civis, sendo mencionadas apenas iniciativas pontuais em ambientes de pesquisa vinculados a instituições militares. Um dos entrevistados observou que "existem muitos laboratórios pesquisando técnicas que poderiam ser aplicadas a tecnologias letais autônomas, mas não conheço um projeto específico de tecnologia letal autônoma em andamento".

Outros apontaram que há interesse crescente, mas ainda fragmentado, com a atuação restrita a temas como inteligência computacional, processamento de sinais, visão computacional, fusão sensorial e inteligência de enxame. A formação de recursos humanos, segundo os entrevistados, esbarra na ausência de incentivos e de programas acadêmicos mais integrados com a área de defesa. Como sugerido por um respondente, "é muito importante para um país consolidar uma cultura científica voltada para a soberania nacional para a inovação segura em defesa". Outro recomendou "a criação de programas acadêmicos específicos em sistemas de defesa e tecnologias sensíveis, integrando engenharia, IA, direito e estratégia".

Os entraves à maior participação da academia incluem falta de incentivos, restrições institucionais, dificuldades de acesso a dados sensíveis e ausência de projetos estruturados em parceria com as FA ou a indústria. Um entrevistado comentou que a pós-graduação militar poderia ser mais bem aproveitada com orientação clara e oferta de dados reais: "usar uma base de dados adequada certamente vai permitir um maior envolvimento entre a academia e o meio militar".

No setor Industrial, os entrevistados demonstraram forte interesse no desenvolvimento de SARP com funções letais autônomas, ressaltando que esse tipo de tecnologia é considerado inevitável e estratégico para a soberania nacional. Uma das empresas afirmou que "a capacidade de dominar essa tecnologia representa uma oportunidade estratégica: ela aumenta a capacidade dissuasória do Brasil, reduz a dependência de fornecedores externos e fortalece a nossa BID".

As empresas relataram dispor de capacidades técnicas avançadas, inclusive em sensores de alta precisão, IA embarcada e comunicações seguras, embora ainda enfrentem obstáculos relacionados ao cerceamento tecnológico de alguns componentes críticos. A principal condição apontada para o avanço de projetos é a existência de demanda institucional e apoio político: "a indústria só se organiza quando há perspectiva de contratação ou financiamento", afirmou um entrevistado. Outro destacou que "não consideramos viável nem estratégico adaptar modelos estrangeiros; isso nos manteria em dependência tecnológica e sujeitos a embargos".

Outro representante reforçou a importância da soberania tecnológica, afirmando que o Brasil "precisa urgentemente garantir as capacidades mínimas para garantir que os interesses legítimos do povo brasileiro não sejam negados". A urgência do investimento na BID foi reforçada com base em múltiplos exemplos geopolíticos, como os conflitos na Ucrânia, Nagorno-Karabakh e no Oriente Médio.

Além disso, as entrevistas com representantes da indústria revelam preocupação com as incertezas regulatórias e ausência de apoio governamental concreto. Um dos entrevistados afirmou que "na atual situação do Brasil não vejo suporte ou parcerias para o desenvolvimento

desta tecnologia”, destacando que “as FA não têm recursos para manter a operação com a demanda de defesa e com pouco adestramento”. A dependência de decisões políticas foi apontada como um gargalo estrutural.

Os três setores reconhecem a relevância do tema e indicam interesse em desenvolver ou colaborar com soluções nacionais em SARP com funções letais autônomas. Todavia, a transformação desse interesse em uma agenda concreta de desenvolvimento depende da superação de entraves regulatórios, da construção de marcos institucionais, do fortalecimento do fomento público e da articulação consistente entre FA, indústria e academia.

4.2.2 Capacidades técnicas e recursos humanos

As entrevistas revelam que a percepção sobre as capacidades nacionais para o desenvolvimento e integração de SARP armados com funções autônomas é heterogênea entre os setores da Tríplice Hélice, refletindo diferentes graus de maturidade tecnológica, conhecimento institucional e infraestrutura disponível. De maneira geral, os três setores reconhecem avanços técnicos significativos em áreas específicas, mas também apontam lacunas críticas que limitam a transformação dessas competências em sistemas operacionais prontos para emprego militar. Essa heterogeneidade, embora seja um reflexo natural da diversidade de papéis desempenhados por cada setor, também indica a ausência de uma estratégia integrada capaz de mobilizar de forma coordenada o potencial existente.

No setor Governo/FA, destaca-se a avaliação de que a MB possui experiência consolidada em sensoriamento remoto, patrulha, vigilância e emprego de sistemas embarcados em plataformas não tripuladas. Contudo, ainda carece de doutrina, estruturas de comando e controle adaptadas e capacidade integrada para operar sistemas com letalidade autônoma. Um entrevistado destacou que “os sistemas devem operar de forma autônoma, e contar com sensores visuais, radar e AIS, além de fornecer informações ao SisGAAz em tempo real”, apontando a intenção de uso avançado desses meios, mas ainda no escopo de missões de esclarecimento.

Em outro depoimento, foi citado que “o emprego de armamento letal gera preocupações sobre o grau de autonomia das tecnologias e a proporcionalidade do emprego da força”, sinalizando desafios jurídicos e operacionais ainda não resolvidos. Esses relatos mostram que, embora haja conhecimento prático em sistemas de vigilância e C2, a transição para plataformas com letalidade autônoma exige não apenas meios técnicos, mas também marcos normativos e doutrinários robustos.

Entre os principais gargalos operacionais apontados, destacam-se a limitação, a irregularidade e os frequentes contingenciamentos no orçamento de defesa, fatores que afetam a previsibilidade dos investimentos em tecnologia, bem como a dificuldade de retenção de conhecimento técnico, associada à rotatividade de militares e à carência de servidores civis especializados. A formação de quadros é reconhecida como uma prioridade, com referências a iniciativas conduzidas por instituições militares e civis de ensino, pesquisa e desenvolvimento, ainda que sem escala suficiente para sustentar ciclos longos e contínuos de desenvolvimento tecnológico. Essa percepção converge com as análises apresentadas no Capítulo 3, que identificaram a fragmentação das iniciativas e a falta de continuidade como obstáculos centrais à maturação de projetos estratégicos.

No setor acadêmico, os entrevistados apontam a existência de competências técnicas relevantes em áreas como inteligência artificial, visão computacional, navegação autônoma, fusão sensorial e processamento de sinais. Segundo esses relatos, tais competências encontram-se distribuídas em diferentes instituições de ensino e pesquisa, incluindo organizações militares de ensino, como o IME e o ITA, bem como universidades civis com atuação nessas áreas tecnológicas.

Entretanto, apontam que tais capacidades estão dispersas, sem articulação sistêmica voltada ao desenvolvimento de sistemas letais autônomos. Um dos entrevistados afirmou que “há muitos laboratórios pesquisando técnicas que poderiam ser aplicadas, mas não conheço um projeto específico de tecnologia letal autônoma em andamento”. Esse depoimento confirma que, apesar do potencial científico, ainda falta uma coordenação estratégica que conecte pesquisas acadêmicas às necessidades operacionais das Forças Armadas.

Além disso, a ausência de dados sensíveis, a falta de recursos financeiros e o descompasso entre as agendas acadêmicas e as demandas operacionais das FA dificultam a conversão de conhecimento em soluções aplicadas. Um entrevistado sugeriu “alinhar o interesse de um possível orientador com o da força”, ressaltando que a formação de recursos humanos exige planejamento conjunto e acesso a problemas reais.

Ainda assim, foram apontadas várias linhas promissoras: algoritmos de navegação autônoma, redes neurais para reconhecimento de alvos e inteligência de enxames embarcada. Esse conjunto de competências acadêmicas, se devidamente orientado, pode servir como base para um ecossistema de inovação dual-use, em que soluções inicialmente civis sejam adaptadas para o setor de defesa.

No setor Industrial, os entrevistados foram unânimes em afirmar que a BID nacional possui capacidades tecnológicas robustas para o desenvolvimento de plataformas SARP,

sensores, enlaces de comunicação seguros e integração de cargas letais. Uma empresa afirmou ter superado internamente desafios relacionados a sensores de alta precisão, IA embarcada e enlaces criptografados, indicando alto nível de prontidão tecnológica. Outra destacou que “a ABIMDE tem, no seu quadro de associadas, inúmeras empresas com conhecimento e experiência para desenvolver e produzir essas soluções”. Esses relatos reforçam que, em termos técnicos, a indústria nacional já domina elementos essenciais para a construção de SARP armados, mas enfrenta dificuldades em transformar essa expertise em programas sustentados, devido à ausência de demanda estatal consistente.

Ainda assim, os representantes do setor apontaram que a ausência de uma demanda institucional estruturada, combinada com barreiras regulatórias e cerceamentos tecnológicos externos, limita a consolidação dessas capacidades. Um entrevistado resumiu: “Na atual situação do Brasil não vejo suporte ou parcerias para o desenvolvimento desta tecnologia”. Outro destacou que o desenvolvimento exige “ação centralizada” e “comprometimento do Estado com o projeto”, reforçando que a maturidade tecnológica isolada não garante, por si só, a capacidade nacional de produção. Essas falas indicam que a lacuna não está apenas no domínio técnico, mas na falta de políticas públicas que assegurem previsibilidade e continuidade.

A capacitação de mão de obra foi outro ponto de convergência entre os entrevistados. As empresas relataram investir em programas internos de qualificação, parcerias com universidades e apoio à pós-graduação de seus engenheiros. Contudo, destacaram a dificuldade de manter talentos no setor de defesa sem garantias de continuidade de projetos. Um entrevistado mencionou que “a capacitação de mão de obra em tecnologias sensíveis é uma prioridade estratégica”, enquanto outro apontou que “o domínio da tecnologia por EED/ED no Brasil garante a total soberania na determinação do uso do PRODE”. Essas observações estão em consonância com preocupações do Capítulo 3, que já destacava a necessidade de alinhar a formação de recursos humanos a programas estratégicos de longo prazo.

Além das capacidades técnicas, algumas entrevistas da indústria revelam preocupações específicas quanto à capacidade de certificação, aos riscos de vulnerabilidade cibernética e à resiliência dos sistemas em ambientes de guerra eletrônica. Um dos entrevistados destacou a necessidade de “certificação desse sistema, considerando a complexidade das operações e seus possíveis danos colaterais”. Outro pontuou a importância de integrar sensores diversos (visão, radar, infravermelho) com algoritmos robustos e arquitetura de comando e controle resiliente, capaz de operar sob interferência e bloqueio de sinal. Esses elementos reforçam a percepção de que o desenvolvimento tecnológico, isolado, não é suficiente: sem certificação, segurança

cibernética e resiliência em ambiente contestado, a capacidade nacional continuará limitada a protótipos ou soluções experimentais.

As entrevistas demonstram que o Brasil possui capacidades técnicas relevantes e dispersas nos três setores, mas ainda insuficientemente integradas e mobilizadas em torno de uma estratégia nacional para o desenvolvimento de SARP armados com funções autônomas. A consolidação dessas capacidades requer, além de recursos, uma agenda institucional coordenada que promova a integração entre os setores e garanta previsibilidade, apoio político e marcos regulatórios adequados. Mais do que isso, o quadro revela que os avanços técnicos e humanos, quando não articulados a políticas de Estado, correm o risco de se perder em ciclos descontinuados de inovação. Portanto, a superação dessa fragmentação é condição indispensável para que o Brasil avance rumo à autonomia tecnológica em sistemas letais autônomos.

4.2.3 Articulação Institucional e Cooperação

As entrevistas revelam uma percepção geral de que a articulação entre os setores da Tríplex Hélice permanece fragmentada e pouco estruturada no que diz respeito ao desenvolvimento e à integração de tecnologias letais autônomas em SARP. Embora existam iniciativas pontuais de cooperação, como projetos de pesquisa, participação em eventos técnicos e programas de formação, os entrevistados de todos os setores indicaram que ainda falta uma estratégia integrada de longo prazo que alinhe capacidades, interesses e objetivos institucionais. Essa fragmentação demonstra que o país ainda carece de mecanismos permanentes de governança tecnológica que possam transformar competências dispersas em programas robustos de inovação.

No setor governamental e militar, os entrevistados reconheceram avanços em projetos específicos, especialmente nas áreas de sensoriamento e navegação. Relataram, contudo, dificuldades em transformar essas iniciativas em programas contínuos e articulados. Um dos entrevistados mencionou que “há iniciativas isoladas, mas falta coordenação institucional para transformar isso em programas estratégicos”. Outro destacou a dificuldade de dar continuidade a projetos em razão da alta rotatividade dos quadros e das mudanças frequentes na estrutura de comando: “há tentativas de interação, mas os projetos não ganham continuidade quando mudam os quadros ou os comandos”. A percepção é de que faltam mecanismos institucionais capazes de garantir estabilidade, previsibilidade e fomento contínuo às colaborações entre as instituições militares e as demais esferas da Tríplex Hélice. Essa descontinuidade, já apontada

no Capítulo 3, compromete a capacidade da Marinha e do Ministério da Defesa de liderarem processos de inovação de longo prazo.

Na academia, os entrevistados ressaltaram as dificuldades de engajamento das universidades civis em projetos sensíveis de defesa. Muitos apontaram obstáculos normativos e éticos, ausência de programas permanentes de parceria e a falta de clareza institucional quanto à participação em temas relacionados à letalidade e à autonomia. Um dos depoimentos foi direto ao afirmar que “falta clareza sobre como a universidade pode se engajar nesses temas sem riscos éticos ou institucionais”. Além disso, foi mencionada a escassez de dados operacionais, o que limita a viabilidade de pesquisas aplicadas com alto grau de aderência às demandas reais das FA. Como resumiu outro pesquisador, “as universidades civis ainda enfrentam dificuldade para acessar projetos ou mesmo dialogar com as FA”. A necessidade de criar ambientes de cooperação mais estáveis e transparentes também foi sublinhada por um entrevistado que observou: “seria necessário criar uma cultura de colaboração contínua, com apoio institucional dos dois lados”. Essas observações sugerem que a integração academia–defesa permanece mais como uma aspiração do que como uma realidade estruturada.

O setor industrial, por sua vez, manifestou insatisfação com a ausência de uma demanda institucional clara e com a falta de articulação entre as instituições públicas e privadas. A principal crítica diz respeito à imprevisibilidade de políticas públicas e à escassez de contratos de longo prazo que permitam planejamento e consolidação de capacidades tecnológicas. Um entrevistado sintetizou a situação ao afirmar que “a indústria só se organiza quando há perspectiva de contratação ou financiamento”. Outro foi direto: “sem previsibilidade e sem articulação institucional, a capacidade instalada se perde”. Os representantes da indústria também ressaltaram que, sem uma diretriz nacional de inovação em defesa, os esforços privados tendem a se dispersar em iniciativas pouco coordenadas, reduzindo a eficiência coletiva. Essa ausência de integração efetiva foi destacada em mais de uma fala como um dos maiores obstáculos à conversão de potencial tecnológico em soluções práticas de defesa.

Ainda que os três setores reconheçam a importância da colaboração interinstitucional para o avanço de tecnologias sensíveis de defesa, o que se verifica é a predominância de iniciativas desarticuladas, marcadas por descontinuidades, disputas por recursos e ausência de mecanismos de integração efetiva. As falas dos entrevistados indicam que a cooperação entre os setores da Tríplice Hélice, embora desejada e praticada em nichos específicos, não se institucionalizou como política pública ou como diretriz estratégica da área de defesa. Essa ausência de coordenação limita a capacidade nacional de transformar avanços técnicos dispersos em soluções concretas para a defesa marítima.

Em síntese, o setor governamental e militar mostra capacidade de iniciar projetos, mas não de mantê-los no tempo; a academia dispõe de competências avançadas, mas encontra barreiras normativas e de acesso; e a indústria demonstra prontidão técnica, mas carece de previsibilidade institucional para investir de forma sustentada. O conjunto dessas percepções sugere que a articulação institucional é o elo mais frágil da tríplice hélice brasileira, e que sua superação dependerá da criação de mecanismos formais de coordenação, da definição de uma agenda de longo prazo e da consolidação de instrumentos de financiamento contínuo. Sem esses elementos, mesmo avanços técnicos pontuais permanecerão isolados, sem contribuir de maneira efetiva para a construção de uma capacidade nacional autônoma em tecnologias letais.

4.2.4 Riscos, Desafios e Barreiras

A análise das entrevistas evidencia um consenso entre os três setores da Tríplice Hélice quanto à importância estratégica do desenvolvimento de tecnologias autônomas letais em SARP. No entanto, também é unânime a percepção de que esse processo enfrenta riscos e barreiras significativas, de natureza técnica, jurídica, institucional e orçamentária. Essas dificuldades, embora distintas em cada setor, se complementam e revelam um quadro complexo que limita a maturação de capacidades nacionais.

No setor governamental e militar, diversos entrevistados apontaram vulnerabilidades críticas relacionadas à segurança cibernética, à imprevisibilidade orçamentária e à ausência de certificação nacional para sistemas letais autônomos. Um dos participantes destacou que “o emprego de armamento letal gera preocupações sobre o grau de autonomia das tecnologias e a proporcionalidade do emprego da força”, revelando a incerteza quanto aos parâmetros de engajamento. Outro mencionou a ausência de normas específicas de homologação, o que compromete a legitimidade e a segurança no uso futuro dessas tecnologias. A falta de estabilidade nos recursos públicos, somada à rotatividade de quadros de decisão, agrava a dificuldade de sustentar projetos de longo prazo.

Na academia, a ênfase recaiu sobre dilemas éticos e a responsabilidade moral do emprego de armas autônomas. Pesquisadores ressaltaram a falta de clareza quanto ao conceito de “controle humano significativo” e suas implicações para a doutrina nacional. Também foram citadas dificuldades de acesso a dados sensíveis e a ausência de critérios institucionais claros que orientem o desenvolvimento acadêmico nessa área. Como sintetizou um entrevistado, “falta clareza sobre como a universidade pode se engajar nesses temas sem riscos éticos ou institucionais”. Essa preocupação indica que a fragilidade não está apenas no domínio técnico,

mas também no risco de isolamento acadêmico diante da falta de diretrizes normativas que legitimem sua participação.

O setor industrial, por sua vez, destacou entraves regulatórios e riscos de dependência tecnológica externa. Representantes da BID afirmaram que, mesmo dominando tecnologias críticas como sensores de precisão, IA embarcada e enlaces criptografados, enfrentam barreiras para obter componentes estratégicos sujeitos a regimes internacionais de controle. Um entrevistado foi enfático: “sem previsibilidade e sem articulação institucional, a capacidade instalada se perde”. Outros destacaram que, sem certificação nacional reconhecida, será difícil competir em licitações externas ou assegurar exportações de sistemas desenvolvidos no Brasil. A preocupação com o cerceamento tecnológico aparece de forma recorrente, revelando que a autonomia plena depende não apenas de capacidades internas, mas de uma política clara para reduzir vulnerabilidades externas.

As entrevistas também revelaram preocupação com a falta de mecanismos permanentes de financiamento voltados a tecnologias sensíveis. A dependência de editais genéricos ou de decisões políticas episódicas compromete a continuidade dos projetos. Esse fator foi apontado como risco de fragmentação, desperdício de recursos e perda de talentos. Vários depoimentos sugerem que, sem um marco legal e orçamentário estável, os avanços obtidos em áreas críticas não se converterão em sistemas prontos para emprego. A ausência de previsibilidade impede a indústria de planejar investimentos de longo prazo e a academia de consolidar linhas de pesquisa estáveis, resultando em uma cadeia de inovação marcada pela descontinuidade.

Outro ponto relevante levantado nos depoimentos foi a vulnerabilidade em ambientes contestados, onde guerra eletrônica, *spoofing* e *jamming* comprometem a operação de SARP autônomos. Essa ameaça, destacada tanto por representantes militares quanto por pesquisadores, mostra que a resiliência operacional ainda não foi incorporada como prioridade no desenvolvimento nacional. A falta de testes em cenários marítimos hostis foi mencionada como um risco de grande magnitude, já que pode comprometer a confiabilidade de eventuais sistemas letais brasileiros.

O eixo de riscos e barreiras revela que, embora exista consenso sobre a importância do tema, há fragilidades estruturais que podem comprometer o avanço do Brasil na integração de tecnologias letais autônomas. A ausência de certificação, a vulnerabilidade cibernética, as incertezas éticas e normativas, a dependência de componentes externos e a imprevisibilidade orçamentária formam um conjunto de obstáculos que precisa ser enfrentado de forma sistêmica. Caso contrário, a capacidade nacional permanecerá limitada a iniciativas pontuais, sem alcançar maturidade operacional plena. A superação desses riscos exigirá, portanto, um esforço

articulado que combine marcos regulatórios claros, mecanismos permanentes de fomento e maior convergência institucional entre os atores da tríplice hélice.

4.3 Síntese da Tríplice Hélice: Convergências e Assimetrias

A análise dos dados obtidos nas entrevistas com representantes dos três setores da Tríplice Hélice, Governo/FA, Indústria e Academia, revela um conjunto expressivo de convergências e divergências quanto ao desenvolvimento e à integração de SARP com funções letais autônomas no Brasil. Embora haja consenso sobre a importância estratégica do tema, as posições variam significativamente quanto à urgência da adoção, aos meios disponíveis e às condições necessárias para avançar.

No que se refere ao interesse estratégico, há concordância sobre o potencial das tecnologias autônomas letais para reforçar a soberania nacional, ampliar a capacidade de dissuasão e reduzir riscos operacionais em missões críticas. Entretanto, essa convergência se fragmenta quando se discute a velocidade de adoção. A indústria pressiona por implementação imediata diante do avanço internacional, enquanto a academia adota postura cautelosa, priorizando a construção de arcabouços éticos e normativos sólidos. Já o setor governamental reconhece a relevância do tema, mas condiciona qualquer iniciativa concreta à existência de doutrina, planejamento institucional de longo prazo e respaldo legal adequado.

As capacidades técnicas também são percebidas de forma assimétrica. A indústria afirma dominar tecnologias-chave, como sensores de alta precisão, inteligência artificial embarcada e enlaces de comunicação seguros, mas carece de demanda estruturada e de financiamento consistente. A academia, por sua vez, possui conhecimento avançado em áreas como visão computacional, inteligência de enxames e processamento de sinais, mas sofre com a ausência de dados operacionais, recursos financeiros limitados e desarticulação em relação às demandas militares. As Forças Armadas acumulam experiência operacional e domínio no uso de sensores e sistemas de comando e controle, mas ainda não dispõem de doutrina consolidada para SARP letais, tampouco de uma escala adequada de capacitação para sustentar o desenvolvimento.

No campo da cooperação institucional, o diagnóstico é unânime: todos os setores apontam fragilidades na articulação entre governo, indústria e academia. As entrevistas evidenciaram a inexistência de mecanismos permanentes de integração, a ausência de programas estruturados de financiamento cruzado e a carência de orientação institucional clara. Enquanto a indústria reclama da falta de contratos e encomendas que sustentem investimentos,

a academia denuncia dificuldades de acesso a dados sigilosos e a escassez de incentivos para atuar em projetos de defesa. O setor governamental, por sua vez, reconhece a importância da cooperação, mas admite que a instabilidade orçamentária e a rotatividade de quadros impedem a continuidade de esforços.

Quanto à percepção de riscos e barreiras, os setores apresentam ênfases distintas. A academia foca nos dilemas éticos e na responsabilização moral do emprego de sistemas letais autônomos, o governo se concentra em vulnerabilidades cibernéticas, insegurança jurídica e restrições orçamentárias, enquanto a indústria alerta para entraves regulatórios, dependência de componentes críticos estrangeiros e dificuldades de certificação em nível nacional. Essas diferenças de percepção revelam não apenas distintos referenciais de análise, mas também a ausência de um eixo comum de priorização.

Essas convergências e assimetrias estão resumidas no Quadro 10, que sistematiza os principais achados por eixo de análise.

Quadro 10 - Convergências e assimetrias entre os setores da tríplice hélice

Eixo de Análise	Governo / FA	Academia	Indústria
Interesse Estratégico	Valorização do potencial dos SARP letais para ampliar a Consciência Situacional Marítima e a capacidade de dissuasão.	Ênfase na importância estratégica, porém com abordagem mais reflexiva e cautelosa, destacando aspectos éticos e sociais.	Interesse estratégico inevitável para a soberania nacional.
Urgência de Adoção	Postura pragmática, mas subordinada à existência de doutrina, marcos legais e recursos.	Adoção condicionada à construção normativa, institucional e ética adequada.	Adoção rápida, desde que haja demanda institucional e financiamento.
Capacidades Técnicas	Experiência consolidada em sensoriamento e C2; carência em integração de sistemas letais autônomos.	Conhecimento avançado em IA, visão computacional, fusão sensorial, mas sem foco direto em SARP letais.	Domínio de tecnologias-chave como IA embarcada, sensores de precisão e enlaces seguros.
Formação de Recursos Humanos	Valorização da formação, mas enfrenta problemas com rotatividade de quadros e baixa escala de capacitação.	Necessidade de incentivos e dados reais para maior integração com demandas de defesa.	Investimento em qualificação interna, mas carece de previsibilidade e continuidade em projetos.
Articulação e Cooperação	Cooperação limitada com a academia e a indústria; ausência de mecanismos contínuos.	Aponta falta de incentivo, de acesso a dados sensíveis e de orientação institucional para projetos aplicados.	Descontentamento com ausência de demanda estruturada e parcerias estáveis com o governo e universidades.
Percepção de Riscos e Desafios	Enfatiza aspectos jurídicos, vulnerabilidade cibernética e imprevisibilidade orçamentária.	Foco em ética, responsabilidade moral, e ausência de arcabouço normativo.	Entraves regulatórios, dependência tecnológica externa e desafios de certificação.
Visão sobre seu Papel no Setor	Operador estratégico, com papel de coordenação e regulador, mas limitado por instabilidade institucional.	Fornecedora de conhecimento e formação, mas ainda marginal no processo decisório.	Desenvolvedora de soluções tecnológicas, mas dependente de políticas públicas claras.

Fonte: Entrevistas com representantes da tríplice hélice

A leitura integrada dessas percepções reforça a ideia de que nenhum setor se vê plenamente capaz de liderar sozinho o desenvolvimento e a integração de sistemas letais autônomos. O avanço dependerá da superação das assimetrias identificadas, da criação de canais permanentes de cooperação e do alinhamento entre interesses estratégicos, capacidades técnicas e mecanismos institucionais. Essa leitura reforça a necessidade de transformar convergências pontuais em uma agenda estruturada de longo prazo, capaz de sustentar o desenvolvimento de capacidades autônomas letais sob supervisão nacional e com legitimidade normativa.

4.4 Conexões com os Capítulos Anteriores

A análise das entrevistas realizadas com representantes da tríplice hélice, Governo/MB, BID e Academia, evidencia um alinhamento substancial com os achados dos capítulos anteriores, mas também revela lacunas que precisam ser superadas para consolidar um ecossistema nacional robusto voltado à integração de tecnologias autônomas letais em SARP. O presente item busca estabelecer essas conexões, retomando os principais achados dos capítulos 2 (Estado da Arte) e 3 (Desenvolvimento e Integração Tecnológica) e relacionando-os às percepções, capacidades e desafios identificados junto aos atores nacionais.

No Capítulo 2, demonstrou-se que o desenvolvimento e emprego de sistemas autônomos letais estão em franca expansão global, com destaque para plataformas como o MQ-9 Reaper (EUA), o Bayraktar TB2 (Turquia) e o Wing Loong II (China). Esses modelos compartilham características como modularidade, flexibilidade de carga útil, capacidade de vigilância persistente e integração progressiva de funções autônomas, sempre sob supervisão humana. A industrialização desses sistemas tem sido acompanhada por políticas públicas de fomento, estratégias de nacionalização tecnológica e marcos regulatórios específicos.

Nas entrevistas, esse panorama internacional foi compreendido de forma realista. Representantes da Marinha reconheceram a distância que ainda separa o Brasil dessas referências, mas destacaram que iniciativas em curso, como o fortalecimento do Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha (SCTIMar), o investimento em sensores navais e a criação de centros especializados como o Esquadrão de Guerra Cibernética, podem funcionar como vetores de transformação. Esses pontos dialogam diretamente com o item 2.2, que tratou dos sensores embarcados e tecnologias críticas, e com o item 2.4, que abordou os desafios da autonomia energética no ambiente marítimo.

O Capítulo 3 examinou o cenário nacional de integração tecnológica. Foram identificadas plataformas com potencial de adaptação para funções letais e autônomas, como o Nauru 1000C, o Falcão, o Caçador e o Atobá XR. Também foram evidenciados entraves concretos, como o cerceamento tecnológico, a dependência de componentes críticos estrangeiros e a ausência de doutrinas operacionais consolidadas. Esses achados convergem com a percepção de entrevistados da indústria, que expressaram preocupação com barreiras à certificação de softwares de missão, homologação de IA embarcada e obtenção de sensores estratégicos. O reconhecimento dessas limitações reforça a análise do item 3.2.1, que destacou a necessidade de reconfiguração modular das plataformas em função das exigências do ambiente marítimo.

Além disso, o Capítulo 3 ressaltou a importância da articulação institucional, tomando como exemplo a trajetória do Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB) e os mecanismos de offset empregados por outros países. Esse ponto foi corroborado em várias entrevistas, sobretudo nas falas de representantes da academia e da Marinha, que enfatizaram a ausência de mecanismos estruturados de coordenação e de uma política de Estado para tecnologias emergentes de uso dual. Essa convergência ganha relevância frente às recomendações do item 3.3.4, que propôs um caminho estratégico baseado em capacitação progressiva, construção doutrinária e estabelecimento de um marco regulatório específico.

O diálogo entre os capítulos e as entrevistas também revelou disparidades importantes. Um exemplo foi a percepção otimista, por parte de alguns representantes da indústria, sobre a prontidão de certas tecnologias, contrastando com os alertas do Capítulo 2 quanto aos riscos de empregar soluções não testadas em ambiente marítimo hostil. Enquanto o item 2.4 advertiu sobre as limitações da autonomia energética e as vulnerabilidades em cenários contestados, alguns entrevistados minimizaram esses obstáculos, sugerindo uma confiança excessiva na adaptação rápida de plataformas terrestres para o mar.

Outro ponto de assimetria surge na dimensão normativa. O Capítulo 3 foi explícito ao indicar a inexistência de regulamentação específica para SARP armados, tanto no plano nacional quanto no âmbito das Forças Armadas. Essa lacuna foi reconhecida pelos setores acadêmico e militar nas entrevistas, mas recebeu menor atenção de representantes da indústria, que mostraram pouca preocupação com os aspectos jurídicos e de governança. Essa desconexão pode comprometer a viabilidade futura da integração de sistemas letais autônomos, caso não haja esforço coordenado para alinhar expectativas entre os atores envolvidos.

Por fim, a síntese dos achados confirma a hipótese central do relatório: a possibilidade de o Brasil integrar tecnologias letais autônomas em SARP voltados à defesa marítima é

sustentada por uma base técnica e institucional real, embora fragmentada. Os capítulos anteriores indicaram caminhos e modelos possíveis, enquanto as entrevistas trouxeram percepções que confirmam, complementam ou tensionam essas análises. Essa conexão entre teoria e prática permite delinear recomendações que favoreçam a convergência de esforços da tríplice hélice rumo à construção de capacidades autônomas armadas sob supervisão nacional e controle responsável.

Essas conexões estão organizadas no Quadro 11.

Quadro 11 - Conexões entre Capítulos e Entrevistas

Eixo Temático	Capítulos Técnicos (2 e 3)	Entrevistas (Cap. 4)	Convergência / Assimetria
Importância da autonomia tecnológica	Destacada como estratégica e indispensável à soberania.	Reforçada por todos os setores, especialmente pelas FA.	Convergência
Barreiras à integração de tecnologias letais	Listadas como críticas: sensores, enlaces, IA embarcada, doutrina.	Reconhecidas, mas com diferentes ênfases (governo foca em orçamento; indústria aponta regulação; academia enfatiza pessoal).	Convergência parcial com ênfases divergentes
Cerceamento tecnológico e dependência externa	Tratado como risco central.	Identificado com clareza por FA e indústria, pouco mencionado pela academia.	Assimetria
Capacidades nacionais existentes	Avaliação de plataformas (Nauru, Caçador, Falcão etc.) mostra potencial latente.	Percepção positiva na indústria e FA; parte da academia mostra ceticismo quanto à escala e maturidade.	Convergência parcial
Integração com o SisGAAz e ambiente marítimo	Considerada essencial, mas ainda incipiente.	Apontada como relevante por representantes da Marinha; pouco mencionada pelos outros setores.	Assimetria
Viabilidade de operação autônoma supervisionada	Adotada como caminho estratégico gradual.	Concordância majoritária, com ressalvas legais e doutrinárias.	Convergência
Formação de recursos humanos especializados	Apontada como lacuna crítica.	Confirmada amplamente, sobretudo pela academia.	Convergência
Coordenação entre os atores da Tríplice Hélice	Identificada como deficiente.	Enfatizada nas entrevistas, com críticas à ausência de política integrada.	Convergência
Participação da MB	Reconhecida como limitada nos projetos atuais, com potencial de ampliação.	Percepção semelhante nas entrevistas com FA e indústria.	Convergência
Marco regulatório para SARP armados	Avaliado como inexistente e urgente.	Ponto de atenção comum entre os setores, com forte demanda por normas específicas.	Convergência

Fonte: Entrevistas com representantes da tríplice hélice

A leitura integrada reforça que o cruzamento entre evidências técnico-operacionais e percepções institucionais permite uma visão mais precisa dos nós críticos e potenciais pontos de alavancagem. Essa abordagem plural evidencia que a construção de capacidades nacionais

em tecnologias letais autônomas exige superar fragmentações, transformar convergências pontuais em políticas de Estado e alinhar expectativas entre os setores.

A análise das entrevistas evidencia que, embora haja convergência entre governo, indústria e academia quanto à relevância estratégica da integração de tecnologias letais autônomas em SARP, persiste um quadro de fragmentação, desarticulação e assimetrias na percepção sobre capacidades, prazos e prioridades. De um lado, a indústria demonstra prontidão tecnológica e urgência em transformar essas competências em projetos operacionais; de outro, a academia ressalta limites éticos, jurídicos e institucionais, enquanto as Forças Armadas equilibram expectativas entre potencial estratégico e restrições orçamentárias e normativas.

Essa dinâmica revela que nenhum setor isoladamente é capaz de liderar o processo, sendo indispensável uma estratégia coordenada que supere a lógica de iniciativas pontuais e descontinuadas. O Capítulo 4, portanto, reforça o diagnóstico de que a consolidação de uma capacidade nacional em SARP letais autônomos não depende apenas da disponibilidade de tecnologias, mas sobretudo da criação de mecanismos de governança, previsibilidade de recursos e alinhamento entre os atores da tríplice hélice. Essa constatação fundamenta as recomendações estratégicas que serão detalhadas no Capítulo 5.

5 CONCLUSÃO

A presente investigação teve como objetivo analisar as condições técnicas, operacionais e institucionais para a integração de tecnologias autônomas letais em SARP, com foco na defesa do ambiente marítimo brasileiro. A partir de uma abordagem metodológica que combinou fundamentação teórica, análise do estado da arte, levantamento de capacidades nacionais e entrevistas com representantes da tríplice hélice, MB, BID e instituições acadêmicas, foi possível construir um diagnóstico multifacetado e criterioso sobre os desafios e oportunidades relacionados ao tema.

Além de responder à questão central proposta, a pesquisa também buscou contribuir para uma reflexão estratégica mais ampla, que coloca a Marinha do Brasil diante do dilema entre manter sua dependência de tecnologias importadas ou avançar em direção a uma autonomia gradual, mesmo que com custos e riscos iniciais. Essa reflexão é particularmente relevante em um cenário internacional marcado por rápidas transformações tecnológicas, pela multiplicação de atores capazes de desenvolver ou empregar sistemas autônomos e pela crescente centralidade do domínio marítimo para o comércio, a exploração de recursos e a defesa nacional.

O estudo evidenciou que a integração de funções letais autônomas em SARP exige mais do que soluções tecnológicas pontuais: pressupõe um entendimento aprofundado sobre os graus de autonomia possíveis, as distinções fundamentais entre automação e autonomia, bem como os limites éticos, normativos e operacionais da delegação de decisões críticas a sistemas artificiais.

A ausência de consenso conceitual internacional afeta principalmente os processos de classificação, análise e avaliação de sistemas autônomos, com implicações diretas para a formulação de políticas públicas, para a interoperabilidade entre forças e para o diálogo técnico-diplomático em fóruns multilaterais. Nesse contexto, a clareza conceitual refere-se menos à condução operacional das missões e mais à forma como capacidades são descritas, comparadas e avaliadas em nível institucional e estratégico, evitando ambiguidades que possam comprometer decisões de planejamento, cooperação internacional ou aquisição tecnológica.

Esse aspecto conceitual não constitui um elemento secundário, pois influencia diretamente a forma como capacidades autônomas são analisadas, comparadas e incorporadas ao planejamento institucional. A inexistência de definições consensuais no plano internacional permite que o Brasil adote critérios analíticos compatíveis com suas necessidades tecnológicas e operacionais, desde que esses critérios sejam explicitados de forma clara e consistente. Tal clareza contribui para evitar ambiguidades na formulação de políticas, no diálogo técnico

internacional e na interpretação externa das iniciativas nacionais, sem implicar, necessariamente, a antecipação de marcos normativos ou doutrinários formais.

A análise das tendências internacionais demonstrou que diversos países vêm investindo na integração incremental de capacidades autônomas letais, com destaque para os Estados Unidos, China, Israel e Turquia. Nesses casos, observa-se a convergência entre sensores multiespectrais, inteligência artificial embarcada, arquitetura modular, algoritmos adaptativos e fontes de energia de alta densidade, com vistas à operação em cenários de acesso negado, guerra eletrônica e patrulha prolongada sem intervenção humana direta. O Brasil, ainda que distante dessa fronteira tecnológica em termos operacionais, possui elementos promissores que justificam a adoção de uma estratégia de desenvolvimento gradual.

A comparação com países que concentram maior experiência no desenvolvimento e emprego de SARP armados evidencia diferenças relevantes de escala, maturidade tecnológica e intensidade de uso operacional, mas também oferece referências empíricas úteis para análise. Enquanto os Estados Unidos operam sistemas altamente complexos em múltiplos teatros, casos como os da Turquia e de Israel demonstram trajetórias de desenvolvimento mais focadas, baseadas em investimentos direcionados, ciclos rápidos de experimentação e emprego operacional contínuo.

Essas experiências indicam que processos graduais de aprendizado técnico e institucional podem ocorrer mesmo sem a replicação de modelos de grande escala, desde que alinhados às capacidades industriais, operacionais e organizacionais de cada país. No contexto brasileiro, a adoção de abordagens graduais, iniciando-se por aplicações mais restritas e de menor complexidade, como a vigilância marítima persistente e a integração com sistemas navais já em uso, como o SisGAaz, mostra-se mais compatível com as limitações técnicas, institucionais e orçamentárias identificadas ao longo deste relatório.

A experiência nacional com sistemas como o Nauru, desenvolvido pela empresa XMobots, indica a existência de iniciativas e competências técnicas relevantes no campo da autonomia não letal, com aplicações concretas em missões de vigilância e reconhecimento. De forma complementar, a presença de instituições de ensino e pesquisa como o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), o Instituto Militar de Engenharia (IME), a COPPE/UFRJ e a Universidade de Brasília (UnB) sugere a disponibilidade de conhecimento técnico potencialmente aplicável ao desenvolvimento de tecnologias autônomas embarcadas.

No entanto, este relatório não se propôs a mapear de forma exaustiva a articulação entre essas competências e programas estruturados de defesa, limitando-se a identificar indícios de que a transformação desse conhecimento em capacidades operacionais depende de mecanismos

institucionais, industriais e organizacionais que extrapolam o escopo estritamente técnico. A análise realizada ao longo deste relatório indica a existência de dificuldades recorrentes na transformação de iniciativas de pesquisa e desenvolvimento em programas contínuos de inovação em defesa.

Entre os fatores identificados, destacam-se a dependência de demandas governamentais pontuais por parte da indústria, bem como restrições orçamentárias que afetam a previsibilidade e a continuidade de investimentos tecnológicos no âmbito das Forças Armadas. Os elementos analisados ao longo do relatório sugerem que a predominância de iniciativas pontuais e a baixa previsibilidade institucional constituem fatores que dificultam a continuidade de esforços tecnológicos no campo dos SARP com funções autônomas. Essa constatação indica que avanços sustentados nessa área tendem a depender de arranjos institucionais capazes de conferir maior estabilidade e coordenação às iniciativas existentes, sem prejuízo de abordagens experimentais e incrementais.

As entrevistas com especialistas e tomadores de decisão revelaram que há uma percepção comum quanto à viabilidade técnica de desenvolvimento de SARP letais autônomos no médio prazo, mas também um consenso sobre os obstáculos que ainda precisam ser superados: restrições energéticas, ausência de protocolos nacionais de validação, baixa integração entre sensores e algoritmos decisórios, e a persistente fragmentação entre academia, indústria e forças operativas. Em paralelo, identificaram-se importantes oportunidades, como o uso dual das tecnologias, a abertura institucional a projetos inovadores e o valor estratégico da vigilância marítima como vetor de mobilização tecnológica.

As entrevistas evidenciam que a visão de futuro não é homogênea. Enquanto alguns representantes da indústria acreditam que a BID pode, em poucos anos, fornecer plataformas adaptadas para missões armadas, acadêmicos ressaltam que a maturidade dos algoritmos embarcados e a robustez dos sensores ainda estão aquém das exigências de cenários contestados. Já representantes militares reconhecem o potencial de uso em missões específicas, mas alertam que a doutrina nacional ainda não está preparada para delegar decisões de engajamento a sistemas artificiais. Esse mosaico de percepções mostra que o debate está amadurecendo, mas carece de convergência estratégica.

A análise integrada dos capítulos permitiu identificar os principais nós críticos para a maturação de um programa nacional de SAAL embarcados: (i) a limitação da autonomia energética das plataformas atuais para cobrir grandes áreas oceânicas, como a Amazônia Azul; (ii) a lacuna entre o desenvolvimento acadêmico e a capacidade de produção em escala industrial; (iii) a dependência de componentes importados sensíveis, como sensores,

processadores e circuitos embarcados; e (iv) a inexistência de uma instância nacional de certificação e controle para sistemas com capacidade letal autônoma. Por outro lado, o levantamento apontou elementos de alavancagem importantes, como: (i) a consolidação de protótipos nacionais em operação real; (ii) o capital científico disponível em instituições públicas de referência; (iii) a adesão crescente das FA a projetos tecnológicos disruptivos; e (iv) a centralidade da defesa marítima nas agendas estratégicas e orçamentárias da MB.

Esses nós críticos e fatores de alavancagem mostram que o desafio brasileiro não é apenas tecnológico, mas institucional. A integração de SARP letais depende de uma coordenação mais estreita entre os atores da trílice hélice, capaz de superar a fragmentação atual e gerar sinergias. Essa coordenação é necessária tanto para acelerar a maturação tecnológica quanto para evitar sobreposição de esforços ou desperdício de recursos em projetos redundantes.

Conclui-se, portanto, que a integração de tecnologias autônomas letais em SARP no contexto brasileiro é tecnicamente possível, desde que enfrentada com realismo estratégico e planejamento articulado. A viabilidade do processo depende da combinação de investimentos consistentes em pesquisa e desenvolvimento, fortalecimento da BID com foco na inovação voltada ao uso civil e militar, ampliação da cooperação intersetorial e formulação de marcos normativos que garantam legitimidade, segurança e responsabilização nos processos decisórios dos sistemas empregados.

Ao final do trabalho, pode-se afirmar que os objetivos propostos foram atendidos. O objetivo geral, que consistia em analisar as condições técnicas, operacionais e institucionais para a integração de tecnologias autônomas letais em SARP voltados à defesa do ambiente marítimo, foi alcançado por meio da articulação entre revisão teórica, estudos de caso internacionais, mapeamento da infraestrutura científica e produtiva nacional, e análise das percepções dos principais atores envolvidos.

O primeiro objetivo específico, relativo à avaliação da maturidade e capacidade de integração de sensores e sistemas embarcados em SARP nacionais, foi atingido com base no levantamento de tecnologias já disponíveis e de pesquisas em curso nos centros de excelência nacionais.

O segundo objetivo específico, que tratava da análise do impacto da autonomia energética sobre a operacionalidade de missões marítimas de longa duração, foi abordado nos capítulos técnicos e nos relatos colhidos nas entrevistas, que apontaram esse fator como um dos maiores gargalos operacionais.

O terceiro objetivo específico, voltado à viabilidade de adaptação de modelos internacionais ao contexto tecnológico da MB, foi explorado por meio de comparação entre plataformas estrangeiras e a realidade nacional, destacando possibilidades concretas de desenvolvimento incremental.

O quarto objetivo específico, relacionado à articulação entre governo, indústria e academia, foi desenvolvido por meio das entrevistas com representantes da tríplice hélice, das análises institucionais e da identificação de entraves e caminhos para a inovação coordenada.

Ainda que este trabalho não tenha formulado uma hipótese formal no sentido clássico, operou com a premissa orientadora de que a autonomia tecnológica em sistemas letais aéreos é viável no Brasil se houver um esforço coordenado, sustentado e orientado por diretrizes estratégicas claras. Os dados levantados e as análises realizadas sustentam essa premissa. Essa constatação reforça que a contribuição deste TCD não se limita a descrever tendências ou mapear capacidades existentes, mas propõe um quadro de ação estratégico para orientar o avanço do país nesse setor.

Este relatório apresenta uma contribuição para os estudos de defesa no Brasil ao oferecer uma análise sistematizada sobre a viabilidade técnica e institucional da integração de sistemas aéreos remotamente pilotados com funções letais autônomas no ambiente marítimo. Diferentemente de trabalhos predominantemente concentrados nos aspectos éticos ou normativos do debate internacional, a pesquisa buscou mapear capacidades existentes, identificar gargalos tecnológicos e institucionais e organizar, de forma analítica, elementos que podem subsidiar reflexões estratégicas sobre o desenvolvimento dessas capacidades no contexto nacional.

Essa abordagem prática e aplicada, construída a partir da combinação de literatura, análise comparativa e entrevistas com representantes da tríplice hélice, confere ao estudo originalidade e relevância direta para a formulação de políticas públicas e para a tomada de decisão no âmbito da defesa nacional.

5.1 Recomendações

Os encaminhamentos estratégicos a seguir destinam-se, de forma articulada, ao Estado brasileiro, com ênfase no Ministério da Defesa e na Marinha do Brasil, em coordenação com órgãos de fomento, a Base Industrial de Defesa e instituições científicas e tecnológicas. As recomendações consideram o papel indutor do poder público na formulação de políticas, na organização de capacidades e na coordenação interinstitucional necessária ao desenvolvimento de tecnologias autônomas letais.

Este relatório propõe os seguintes encaminhamentos estratégicos:

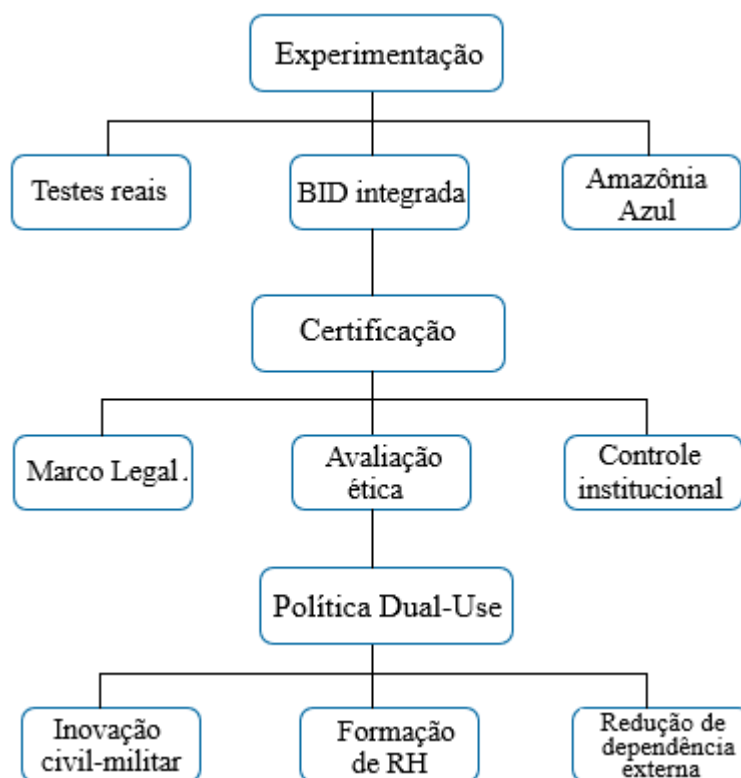
- Criar um programa nacional de experimentação e validação de SARP com funções autônomas, envolvendo centros de pesquisa, unidades operativas da Marinha e empresas da BID, com foco em cenários típicos da Amazônia Azul. Esse programa deve priorizar tanto testes em ambiente controlado quanto operações embarcadas, permitindo avaliar o desempenho dos sistemas em condições reais de salinidade, interferência eletromagnética e enlaces intermitentes. A consolidação de um ciclo contínuo de experimentação e retroalimentação tecnológica permitirá reduzir riscos, acelerar a maturidade dos sistemas e criar protocolos nacionais de validação.
- Incentivar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias de uso civil e militar, com critérios de fomento e avaliação que privilegiem a interoperabilidade, a aplicabilidade prática e a consolidação de capacidades estratégicas autônomas. O incentivo a tecnologias dual-use aumenta a escala de produção, diminui custos e fortalece a posição da BID em mercados externos. Ao alinhar políticas industriais civis e militares, o Brasil pode criar economias de escopo e reduzir a dependência de importações críticas.
- Estabelecer, no âmbito do Estado brasileiro, um marco normativo para avaliação, certificação e controle de sistemas letais autônomos, em consonância com o Direito Internacional Humanitário e com os princípios de segurança, rastreabilidade e controle humano significativo. Esse marco pode assumir a forma de diretrizes e instrumentos normativos progressivos, compatíveis com diferentes níveis de maturidade tecnológica, incluindo padrões técnicos mínimos, protocolos de auditoria e instâncias de responsabilização, de modo a conferir previsibilidade institucional, legitimidade internacional e segurança operacional.
- Investir na formação de recursos humanos especializados, com a criação de programas de pós-graduação em engenharia de sistemas autônomos, robótica de defesa, inteligência artificial aplicada e segurança cibernética, em parceria com universidades públicas e centros de excelência técnico-militar. Essa medida é fundamental para assegurar a sustentabilidade de longo prazo e evitar que a falta de mão de obra qualificada se torne um gargalo para a inovação.
- Lançar uma estratégia nacional para tecnologias de uso dual, com foco na redução da dependência externa em componentes críticos, proteção da propriedade intelectual e fortalecimento das capacidades industriais de exportação com certificação nacional. Essa estratégia deve privilegiar offsets tecnológicos em contratos de defesa, estimular a substituição

progressiva de importações e fomentar a produção local de sensores, enlaces criptografados e processadores de IA embarcada.

- Instituir um grupo permanente de assessoramento interinstitucional sobre tecnologias letais autônomas, reunindo representantes das FA, BID, comunidade científica, setor jurídico e órgãos reguladores, para acompanhamento prospectivo das tendências tecnológicas e normativas. Essa instância funcionaria como fórum de convergência estratégica, reduzindo a fragmentação atual e antecipando desafios regulatórios e tecnológicos.

A Figura 16 sintetiza os encaminhamentos estratégicos, entendidos neste relatório como diretrizes orientadoras de natureza técnico-institucional, propostos a partir da análise realizada, organizando-os em torno de três eixos estruturantes interdependentes: experimentação, certificação e política dual-use.

Figura 17 - Eixos Estratégicos para o Desenvolvimento de SARP com SAAL



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O eixo da experimentação contempla a criação de um programa nacional de testes e validação de SARP com funções autônomas, priorizando cenários operacionais típicos da Amazônia Azul e articulando capacidades instaladas na BID. A certificação diz respeito à necessidade de um marco legal e institucional que estabeleça parâmetros técnicos, éticos e

regulatórios para o uso de sistemas letais autônomos, garantindo segurança, rastreabilidade e responsabilização. Por fim, a política dual-use abrange ações voltadas à formação de recursos humanos, ao incentivo à inovação de uso civil e militar e à redução da dependência externa em componentes sensíveis. Esses eixos devem ser abordados de forma coordenada e sistêmica, como condição para a viabilização soberana do emprego de tecnologias autônomas letais no domínio marítimo brasileiro.

5.2 Limitações da pesquisa

As limitações observadas refletem não apenas os desafios metodológicos da pesquisa, mas também a sensibilidade e o grau de sigilo que envolvem temas de defesa e tecnologias de uso militar.

Em primeiro lugar, o sigilo tecnológico restringiu o acesso a dados sensíveis de desempenho, arquitetura de sistemas e protocolos de comando e controle. Informações classificadas ou não publicadas obrigaram a dependência de fontes secundárias, relatórios internacionais e entrevistas com acesso parcial.

Em segundo lugar, há limitações metodológicas decorrentes das escolhas deliberadas de escopo adotadas na pesquisa. Optou-se por concentrar a análise na tríplice hélice, Marinha do Brasil, Base Industrial de Defesa e instituições acadêmicas, uma vez que esses atores representam os principais vetores de integração tecnológica. Questões relacionadas à formulação legislativa, ao controle civil ou à governança jurídica foram apenas tangenciadas, por se tratarem de um campo de investigação próprio, que demandaria um estudo específico e aprofundado. Essa delimitação, embora reduza a abrangência institucional da análise, assegurou maior profundidade na discussão técnico operacional e de integração tecnológica, em consonância com o objetivo central do TCD.

Além disso, o caráter dinâmico das tecnologias autônomas e a rápida evolução dos debates normativos internacionais criam uma limitação temporal, parte das informações poderá tornar-se desatualizada em curto prazo, demandando reavaliação periódica.

Por fim, persistem limitações conceituais e estruturais, a ausência de consenso internacional sobre o significado de autonomia letal e a inexistência de sistemas plenamente operacionais no Brasil dificultam a validação empírica direta. A falta de instâncias formais de certificação e ensaio nacionais também limita a aplicação prática de algumas recomendações.

5.3 Perspectivas para pesquisas futuras

As limitações apresentadas reforçam a necessidade de continuidade da investigação. Trabalhos futuros poderão aprofundar estudos de caso sobre plataformas nacionais como o Nauru, o Falcão e o Atobá XR, analisando sua evolução tecnológica e seu potencial de adaptação ao ambiente marítimo. Outro campo promissor é o exame das implicações normativas e jurídicas internacionais, investigando como tratados de controle de armamentos e regimes de exportação podem afetar a autonomia brasileira.

Além dessas possibilidades, recomenda-se que pesquisas futuras avancem na direção de estudos experimentais conduzidos em cenários costeiros e de mar aberto, de modo a testar protótipos de SARP em condições ambientais adversas e com interferência eletromagnética, elementos centrais da realidade operacional da Amazônia Azul. Esses experimentos permitiriam não apenas validar tecnologias, mas também fornecer subsídios para a formulação de doutrinas específicas de emprego.

Outra linha promissora consiste em aprofundar a análise das implicações éticas e jurídicas da automação letal, explorando os limites do conceito de controle humano significativo e sua aplicação no contexto brasileiro. Pesquisas nessa área poderiam dialogar com o Direito Internacional Humanitário e com a formulação de normas nacionais de certificação, oferecendo segurança jurídica às decisões operacionais.

Finalmente, recomenda-se a realização de estudos voltados à avaliação econômica e industrial, examinando o impacto potencial de políticas de offsets tecnológicos, a viabilidade de parcerias internacionais seletivas e os custos de oportunidade associados à dependência externa. Tais estudos complementariam a dimensão técnica com uma análise de sustentabilidade de longo prazo, indispensável para orientar investimentos e escolhas estratégicas da Base Industrial de Defesa.

5.4 Considerações finais

A análise prospectiva permite considerar cenários distintos para o horizonte de 2040. Em um cenário positivo, caso o Brasil avance de maneira coordenada nos três eixos estratégicos identificados, experimentação, certificação e política dual-use, o país poderá consolidar uma família nacional de SARP letais autônomos, integrados a sistemas navais, aéreos e terrestres.

Esses sistemas ampliariam a capacidade de vigilância persistente sobre a Amazônia Azul, garantiriam maior autonomia decisória e fortaleceriam a posição do Brasil como ator relevante na formulação de normas internacionais sobre o emprego de tecnologias autônomas militares.

Nesse cenário, o Brasil teria conquistado autonomia parcial na produção de sensores e enlaces de dados, alcançado interoperabilidade com sistemas aliados e estabelecido protocolos nacionais de certificação reconhecidos internacionalmente. Em contrapartida, em um cenário de inação, o país poderá em 2040 enfrentar dependência crônica de fornecedores externos, defasagem tecnológica em relação a competidores regionais e vulnerabilidades críticas em áreas como ciberdefesa e resiliência de enlaces.

A limitação na incorporação de tecnologias autônomas em SARP restringe o desenvolvimento de capacidades complementares de vigilância persistente e resposta rápida no ambiente marítimo, sem, contudo, esgotar o conjunto de meios envolvidos na defesa da Amazônia Azul. A estagnação tecnológica nesse segmento específico, associada à ausência de processos de certificação e à escassez de recursos humanos especializados, tende a reforçar a dependência externa em tecnologias sensíveis, reduzindo a capacidade do país de participar de forma mais ativa na definição de padrões técnicos e normativos internacionais relacionados a sistemas autônomos militares.

Embora os objetivos do trabalho tenham sido alcançados, algumas limitações precisam ser reconhecidas. Em primeiro lugar, a inexistência de sistemas letais autônomos efetivamente operacionais no Brasil impediu a análise de casos nacionais em uso real, obrigando a dependência de estudos internacionais e de protótipos em fase de desenvolvimento. Em segundo lugar, a literatura nacional de caráter técnico-operacional sobre o tema é limitada, o que exigiu o uso predominante de referências estrangeiras. Além disso, a própria definição de autonomia letal ainda é objeto de disputa em organismos internacionais, dificultando a adoção de critérios uniformes. No campo empírico, as entrevistas realizadas com representantes da tríplice hélice ofereceram contribuições valiosas, mas a amostra limitada e a ausência de atores de outros setores, como legislativo e sociedade civil, restringem o alcance das conclusões.

Essas limitações apontam para a necessidade de continuidade da pesquisa. Trabalhos futuros poderão aprofundar estudos de caso sobre plataformas nacionais como o Nauru, o Falcão e o Atobá XR, analisando de forma mais detalhada sua evolução tecnológica e seu potencial de adaptação ao ambiente marítimo. Outro campo promissor é o exame das implicações normativas e jurídicas internacionais, investigando como tratados de controle de armamentos e regimes de exportação podem afetar a autonomia brasileira. Além disso, pesquisas poderão explorar a interoperabilidade dos SARP com sistemas de comando e controle já em uso, como o SisGAAz, avaliando a viabilidade de integração incremental.

Além dessas possibilidades, recomenda-se que pesquisas futuras avancem na direção de estudos experimentais conduzidos em cenários costeiros e de mar aberto, de modo a testar

protótipos de SARP em condições ambientais adversas e com interferência eletromagnética, elementos centrais da realidade operacional da Amazônia Azul. Esses experimentos permitiriam não apenas validar tecnologias, mas também fornecer subsídios para a formulação de doutrinas específicas de emprego.

Outra linha promissora consiste em aprofundar a análise das implicações éticas e jurídicas da automação letal, explorando os limites do conceito de “controle humano significativo” e sua aplicação no contexto brasileiro. Pesquisas nessa área poderiam dialogar com o Direito Internacional Humanitário e com a formulação de normas nacionais de certificação, oferecendo segurança jurídica às decisões operacionais.

Finalmente, recomenda-se a realização de estudos voltados à avaliação econômica e industrial, examinando o impacto potencial de políticas de offsets tecnológicos, a viabilidade de parcerias internacionais seletivas e os custos de oportunidade associados à dependência externa. Tais estudos complementariam a dimensão técnica com uma análise de sustentabilidade de longo prazo, indispensável para orientar investimentos e escolhas estratégicas da Base Industrial de Defesa.

Conclui-se, assim, que a integração de tecnologias autônomas letais em SARP no Brasil é tecnicamente viável e estrategicamente necessária, desde que enfrentada com planejamento, investimento e articulação interinstitucional. O país dispõe de centros de excelência acadêmica, de uma BID com competências em expansão e de uma Marinha com interesse crescente em inovação, mas precisa superar gargalos estruturais relacionados à energia, certificação e dependência externa.

O presente trabalho buscou analisar a viabilidade de integração de sistemas de armas autônomas letais em plataformas aéreas no contexto da Marinha do Brasil, tomando como referência a Amazônia Azul. A pesquisa concentrou-se em construir um diagnóstico abrangente a partir da combinação entre fundamentação teórica, exame do estado da arte, análise de plataformas de referência e levantamento empírico junto a representantes da tríplice hélice. Essa abordagem permitiu relacionar tendências tecnológicas internacionais com capacidades nacionais emergentes, contribuindo para identificar os principais desafios de integração tecnológica e institucional no Brasil.

A originalidade deste trabalho não reside na inexistência de estudos prévios sobre sistemas de armas autônomas letais ou sobre plataformas aéreas remotamente pilotadas, mas na forma como o tema é abordado e articulado. Ao integrar, de maneira sistemática, dimensões técnicas, institucionais e estratégicas, a pesquisa desloca o foco de análises predominantemente normativas, conceituais ou setoriais para uma abordagem aplicada, orientada à viabilidade da

integração tecnológica no contexto específico da Marinha do Brasil. Esse recorte analítico e metodológico, associado ao uso de entrevistas com representantes da tríplice hélice e à adoção do formato de relatório técnico-científico, diferencia o estudo no âmbito da produção nacional no campo dos Estudos de Defesa.

O impacto do relatório se manifesta em diferentes planos. No plano social, a pesquisa contribui para qualificar o debate público e institucional acerca da autonomia tecnológica, da soberania e dos riscos associados ao emprego de sistemas letais autônomos, oferecendo subsídios à tomada de decisão de gestores, parlamentares e atores da sociedade civil.

No plano econômico, ao evidenciar gargalos da Base Industrial de Defesa e oportunidades de uso dual, o relatório aponta caminhos para a redução da dependência externa em insumos críticos e para o fortalecimento de setores industriais de alta intensidade tecnológica, com efeitos multiplicadores sobre cadeias produtivas civis e militares.

No plano político-estratégico, a análise fornece elementos para a formulação de políticas públicas e estratégias institucionais, ao identificar obstáculos regulatórios, lacunas de interoperabilidade e desafios de certificação, ao mesmo tempo em que organiza propostas de encaminhamento em torno de três eixos estruturantes: experimentação operacional, certificação normativa e política dual-use. Esses resultados dialogam com a necessidade de fortalecimento da capacidade dissuasória nacional, com a proteção da Amazônia Azul e com o alinhamento aos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil.

A contribuição para políticas públicas e estratégias institucionais decorre justamente desse diagnóstico, que procura organizar elementos técnicos, operacionais e institucionais em uma estrutura analítica capaz de apoiar a Marinha do Brasil e a comunidade científica em programas de desenvolvimento de SARP com funções autônomas. Dessa forma, busca-se que a inovação tecnológica se converta em capacidade operacional efetiva, assegurando segurança jurídica, rastreabilidade e responsabilização.

No que se refere à aderência acadêmica, o trabalho situa-se na área de Defesa, Governança e Segurança Marítimas, com ênfase na linha de Política, Gestão e Logística em Ciência, Tecnologia e Inovação no Ambiente Marítimo. Ao investigar como a integração de tecnologias emergentes em plataformas militares aéreas impacta a formulação de políticas, a capacitação institucional e o desenvolvimento tecnológico nacional, o estudo mantém coerência com os objetivos do Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos e reforça a pertinência do tema no âmbito dos Estudos de Defesa.

Em um mundo marcado pela aceleração tecnológica, pela competição por superioridade informacional e pela militarização crescente de sistemas não tripulados, o Brasil não pode

permanecer como espectador. A construção de autonomia tecnológica nacional em sistemas aéreos letais representa mais do que uma aspiração legítima: é uma condição indispensável para a defesa da Amazônia Azul, para a credibilidade da política de defesa e para a preservação da soberania nacional no século XXI.

REFERÊNCIAS

ÁGREDA, Ángel Gomez de. Ethics of autonomous weapons systems and its applicability to any AI systems. **Telecommunications Policy**, v. 44, n. 6, 101953, 2020. DOI: 10.1016/j.telpol.2020.101953. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101953>. Acesso em: 14 set. 2025.

Agência Marinha de Notícias. **Aeronave remotamente pilotada será empregada na defesa do Brasil**. 2022. Disponível em: <https://www.agencia.marinha.mil.br/defesa-naval/aeronave-remotamente-pilotada-sera-empregada-na-defesa-do-brasil>. Acesso em: 11 jan. 2025.

ALTMANN, Jürgen; SAUER, Frank. **Autonomous weapon systems and strategic stability**. *Survival*, v. 59, n. 5, p. 117–142, 2017. Disponível em: <https://www.fcas-forum.eu/publications/Autonomous-Weapon-Systems-and-Strategic-Stability.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2025.

AMARANTE, José Carlos Albano do. **A base industrial de defesa brasileira**. Texto para Discussão, n. 1758. Rio de Janeiro: IPEA, agosto 2012. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1758.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. RBAC-E nº 94 – **Requisitos Gerais para Aeronaves Remotamente Pilotadas**. Resolução nº 419, de 2 de maio de 2023. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>. Acesso em: 10 set. 2025.

ANDRADE, Israel de Oliveira; FRANCO, Luiz Gustavo Aversa. **Desnacionalização da indústria de defesa no Brasil**: implicações em aspectos de autonomia científico-tecnológica e soluções a partir da experiência internacional. Brasília: IPEA, Texto para Discussão n. 2178, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/64eafd04-825c-4401-a498-5294065a137b/content>. Acesso em: 1 set. 2025.

ANGELOV, Grudi. Military Implications of the Nagorno-Karabakh Conflict: Tactics and Technologies. **Information & Security: An International Journal**, v. 51, p. 49–55, 2022. DOI: 10.11610/isij.5104. Disponível em: https://procon.bg/system/files/5104_nagorno-karabakh.pdf. Acesso em: 3 set. 2025.

ATLANTIC COUNCIL. **Turkey's Bayraktar TB2 drone and implications for future warfare**. Washington, DC: Atlantic Council, 2023. Disponível em: <https://www.atlanticcouncil.org/>. Acesso em: 9 set. 2025.

AUSTIN, Reg. **Unmanned Aircraft Systems: UAV Design, Development and Deployment**. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.

AUTOMATED RESEARCH. **Brazil has participated in all Convention on Certain Conventional Weapons (CCW) meetings on autonomous weapons systems**. Brazil supports the negotiation of a legally binding instrument on autonomous weapons systems. [S.l.], s.d. Disponível em: https://automatedresearch.org/news/state_position/brazil/

AVIBRAS INDÚSTRIA AEROESPACIAL S.A. **Falcão ARP**. [S. l.]: Avibras, [s. d.]. Disponível em: <https://www.avibras.com.br/site/areas-de-atuacao/historico-de-produtos-e-servicos/falcao.html>. Acesso em: 11 jan. 2025.

AVIBRAS INDÚSTRIA AEROESPACIAL S.A. **VANT Falcão**. São José dos Campos, [s.d.]. Disponível em: <https://avibras.com.br/en/products/falcao/>. Acesso em: 10 set. 2025.

AVIONICS SERVICES. **Caçador – UAV MALE**. Botucatu, [s.d.]. Disponível em: <https://www.avionics.com.br/produtos/cacador/>. Acesso em: 10 set. 2025.

BAJON, Theò; GRAND-CLÉMENT, Sarah. **Uncrewed Maritime Systems: A Primer**. Geneva: United Nations Institute for Disarmament Research, 2022. Disponível em: https://undir.org/files/2022-11/UNIDIR_Uncrewed_Maritime_Systems_Primer.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

BALESTRIERI, E.; DAPONTE, P.; DE VITO, L.; LAMONACA, F. **Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview**. *Sensors*, v. 21, n. 4, art. 1518, 2021. DOI: 10.3390/s21041518. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1518>. Acesso em: 11 set. 2025.

BAYKAR. **Bayraktar Akıncı**. Disponível em: <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-akinci/>. Acesso em: 13 set. 2025.

BAYKAR. **Bayraktar TB2**. Disponível em: <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2/>. Acesso em: 13 set. 2025.

BEKKOUCHE, O.; SAMDANIS, K.; BAGAA, M.; TALEB, T. A Service-Based Architecture for Enabling UAV-Enhanced Network Services. **IEEE Communications Standards Magazine**, v. 6, n. 1, p. 58–64, 2022. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100003. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2201.05454>.

BEKMEZCI, I.; SAHINGOZ, O. K.; TEMEL, Ş. **Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey**. *Ad Hoc Networks*, v. 11, n. 3, p. 1254–1270, 2013. DOI: 10.1016/j.adhoc.2012.12.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>.

BIGGIO, Battista; ROLI, Fabio. Wild patterns: ten years after the rise of adversarial machine learning. **Pattern Recognition**, v. 84, p. 317–331, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2018.07.023>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BINNENDIJK, H.; GOMPERT, D. C.; LIN, B. **Emerging Technologies and National Security: Policy Choices for the Department of Defense**. Santa Monica: RAND Corporation, 2014. Disponível em: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR670.html. Acesso em: 9 set. 2025.

BISTRON, Marta; PIOTROWSKI, Zbigniew. **Artificial Intelligence Applications in Military Systems and Their Influence on Sense of Security of Citizens**. *Electronics*, v. 10, n. 7, p. 871, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/7/871>. Acesso em: 1 set. 2025.

BO, Marta; BRUUN, Laura; BOULANIN, Vincent. **Retaining human responsibility in the development and use of autonomous weapon systems**: on accountability for violations of International Humanitarian Law involving AWS. SIPRI, Solna, Oct, 2022. Disponível em: https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-10/2210_aws_human_responsibility.pdf. Acesso em: 19 ago. 2025.

BODE, Ingvild; WATTS, Tom F. **Loitering Munitions and Unpredictability**: Autonomy in Weapon Systems and Challenges to Human Control. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/371351342_Loitering_Munitions_and_Unpredictability_Autonomy_in_Weapon_Systems_and_Challenges_to_Human_Control. Acesso em: 13 set. 2025.

BOULANIN, Vincent (ed.). **Regulating autonomous weapon systems: issues, actors and processes**. Stockholm: Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI), 2020. Disponível em: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/regulating-autonomous-weapon-systems>. Acesso em: 08 mar. 2025.

BOULANIN, Vincent; PELDÁN CARLSSON, Moa; GOUSSAC, Netta; DAVISON, Neil. **Limits on Autonomy in Weapon Systems**: Identifying Practical Elements of Human Control. Solna: Stockholm International Peace Research Institute; Geneva: International Committee of the Red Cross, 2020. Disponível em: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-06/2006_limits_of_autonomy.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

BOULANIN, Vincent; VERBRUGGEN, Maaïke. **Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems**. Stockholm: SIPRI, 2017. Disponível em: <https://www.sipri.org/publications/2017/other-publications/mapping-development-autonomy-weapon-systems>. Acesso em: 1 set. 2025.

BRAMBILLA, Manuele; FERRANTE, Eliseo; BIRATTARI, Mauro; DORIGO, Marco. Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective. **Swarm Intelligence**, v. 7, n. 1, p. 1–41, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11721-012-0075-2>

BRASIL. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Portaria CAPES n.º 60, de 20 de março de 2019a. **Dispõe sobre o mestrado e doutorado profissionais no âmbito da CAPES**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 mar. 2019. Disponível em: <https://cad.capes.gov.br/ato-administrativo-detalhar?idAtoAdmElastic=884>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 12.725, de 18 de novembro de 2025**. Aprova a Política Nacional de Defesa, a Estratégia Nacional de Defesa e o Livro Branco de Defesa Nacional. Brasília, DF, 2025. Anexo II – Estratégia Nacional de Defesa. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-defesa/livro-branco-de-defesa-nacional-lbdn-1/arquivos/livro-branco-de-defesa-nacional/decreto-no-12-725-de-18-de-novembro-de-2025-dou_lbdn.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

BRASIL. GGE on LAWS – 2019b, “**Human element**” (Agenda item 5(d)): Intervention by Brazil. Genebra: CCW/ONU, 2019. Disponível em: https://unoda-documents-library.s3.amazonaws.com/Convention_on_Certain_Conventional_Weapons_-

_Group_of_Governmental_Experts_%282019%29/Brazil%2BGGE%2BLAWS%2B2019%2B-%2BItem%2B5%2Bd%2B-%2BHuman%2Belement.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016-2022**. Brasília: MCTIC, 2016. Disponível em: <https://bibliotecadigital.gestao.gov.br/bitstream/123456789/990/1/ENCTI-MCTIC-2016-2022.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Marinha. Gabinete do Comandante. **Portaria nº 107/MB/MD, de 29 de maio de 2024**. Cria o Esquadrão de Guerra Cibernética e dá outras providências. Diário Oficial da União: Seção 1, n.º 104, p. 15, 3 ISSN 1677-7042. jun 2024.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília: Ministério da Defesa, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-defesa/estrategia-nacional-de-defesa. Acesso em: 12 mai. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. ICA 100-40 – **Instrução do Comando da Aeronáutica**. Brasília: Comando da Aeronáutica, 2023.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Política Nacional de Defesa e Estratégia Nacional de Defesa**. Brasília: Ministério da Defesa, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-defesa/publicacoes-politica-e-estrategia-nacional-de-defesa/pnd-end-2020.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024

BRASIL. Marinha do Brasil. Portaria nº 213/DGMM, de 12 de agosto de 2022. **Aprova a classificação dos Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP) por categorias de Peso Máximo de Decolagem**. Brasília: MB, 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Projetos estratégicos da Força Aérea Brasileira**. Brasília: Ministério da Defesa, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/industria-de-defesa/paed/projetos-estrategicos/projetos-estrategicos-da-forca-aerea-brasileira-2>. Acesso em: 12 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. **RPA's armadas: o desafio brasileiro**. Brasília: Ministério da Defesa, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/ajuste-01/ensino_e_pesquisa/defesa_academia/cadn/XV_cadn/rpasa_armadas_oa_desafio_brasileiro.pdf. Acesso em: 12 jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Educação. Portaria MEC n.º 389, de 23 de março de 2017. **Dispõe sobre o mestrado e doutorado profissional no âmbito da pós-graduação stricto sensu**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 mar. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/24032017-portaria-no-389-de-23-de-marco-de-2017-pdf/view>. Acesso em: 20 set. 2025.

BRUNDAGE, Miles; AVIN, Shahar; CLARK, Jack; TONER, Helen; ECKERSLEY, Peter; GARFINKEL, Ben; DAFOE, Allan. **The Malicious Use of Artificial Intelligence: Forecasting, Prevention, and Mitigation**. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1802.07228>. Acesso em: 1 set. 2025.

BUREAU OF INDUSTRY AND SECURITY (BIS). **Offsets in Defense Trade: Twenty-Sixth Annual Report**. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, 2022. Disponível em: <https://www.bis.gov/media/documents/public-2022-bis-final-26th-annual-report-defense-offsets-final-7.28.22.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2025.

CAPES – **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior**. Pró-Defesa V – Edital nº 36/2023. Brasília: CAPES, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/editais/20122023_Edital_2295421_SEI_2295126_Edital_36_2023.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

CATUOGNO, L.; GALDI, C. Secure firmware update in IoT devices: A blockchain-based approach. **Journal of Information Security and Applications**, v. 71, p. 103460, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2022.103460>.

CENTER FOR STRATEGIC AND INTERNATIONAL STUDIES (CSIS). **More Than Missiles: China Previews its New Way of War**. Washington, DC: CSIS, 2019. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/more-missiles-china-previews-its-new-way-war>. Acesso em: 13 set. 2025.

CENTER FOR THE STUDY OF THE DRONE (Bard College). **The Drone Databook. Annandale-on-Hudson: Bard College**, 2019. Disponível em: <https://dronecenter.bard.edu/files/2019/10/CSD-Drone-Databook-Web.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

CEVIZ, Özlem; SADIOGLU, Pinar; SEN, Sevil. **A survey of security in UAVs and FANETs: issues, threats, analysis of attacks, and solutions**. arXiv preprint, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2306.14281>. Acesso em: 27 out. 2025.

CHATURVEDI, A.; BANERJEE, S.; KAMAL, R. Comparative review study of military and civilian unmanned aerial vehicles (UAVs). **INCAS Bulletin**, v. 11, n. 3, p. 43-56, 2019. Disponível em: https://bulletin.incas.ro/files/chaturvedi_sekhar_banerjee_kamal__vol_11_iss_3.pdf. Acesso em: 7 set. 2025.

CHINA AEROSPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY CORPORATION (CASC). **CH-5 Rainbow unmanned aerial vehicle**. Beijing: CASC, 2022. Disponível em: <https://www.globalmilitary.net/aircraft/ch-5-rainbow/>. Acesso em: 5 mar. 2025.

CHINA. **Working Paper on Lethal Autonomous Weapons Systems (LAWS)**. Geneva: Group of Governmental Experts on LAWS, Convention on Certain Conventional Weapons, 2022. Disponível em: https://docs-library.unoda.org/Convention_on_Certain_Conventional_Weapons_-_Group_of_Governmental_Experts_%282022%29/CCW-GGE.1-2022-WP.6.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

CNAS – Center for a New American Security. **Drone Proliferation Dataset**. Washington, DC: CNAS, 2024. Disponível em: <https://www.cnas.org/publications/reports/drone-proliferation-dataset>. Acesso em: 13 set. 2025.

CNAS – Center for a New American Security. SCHARRE, P. **AI and the Future of Defense: Report of the CNAS AI and National Security Task Force**. Washington, DC: CNAS, 2021. Disponível em: <https://www.cnas.org/publications/reports/ai-and-the-future-of-defense>. Acesso em: 9 set. 2025.

COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA DÉFENSE. **Avis sur l'intégration de l'autonomie dans les systèmes d'armes létaux**. Paris: Ministère des Armées, 2021. Disponível em: https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/ministere-armees/20210429_Comit%C3%A9%20d%27%C3%A9thique%20de%20la%20d%C3%A9fense%20-%20Avis%20int%C3%A9gration%20autonomie%20syst%C3%A8mes%20armes%20l%C3%A9taux.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

COMITÊ INTERNACIONAL DA CRUZ VERMELHA (CICV). **Artificial intelligence and machine learning in armed conflict: A human-centred approach**. International Review of the Red Cross, 2019. Disponível em: <https://international-review.icrc.org/sites/default/files/reviews-pdf/2021-03/ai-and-machine-learning-in-armed-conflict-a-human-centred-approach-913.pdf>. Acesso em: 1 set. 2025.

COMITÊ INTERNACIONAL DA CRUZ VERMELHA (CICV). **Autonomous weapons: ICRC urges states to launch negotiations for new legally binding rules**. Geneva: ICRC, 2023. Disponível em: <https://www.icrc.org/en/document/statement-international-committee-red-cross-icrc-following-meeting-group-governmental>. Acesso em: 15 set. 2025.

COMITÊ INTERNACIONAL DA CRUZ VERMELHA (CICV). **Autonomous Weapon Systems: Implications of Increasing Autonomy in the Critical Functions of Weapons**. Geneva: ICRC, 2016. Disponível em: https://www.icrc.org/sites/default/files/document/file_list/ccw-autonomous-weapons-icrc-april-2016_0.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

COMITÊ INTERNACIONAL DA CRUZ VERMELHA (CICV). **ICRC position on autonomous weapon systems**. Geneva: ICRC, 2021. Disponível em: <https://www.icrc.org/en/document/icrc-position-autonomous-weapon-systems>. Acesso em: 9 set. 2025.

CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE (CRS). **Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress (R46458)**. Washington, DC: CRS, 2024. Disponível em: <https://sgp.fas.org/crs/natsec/R46458.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE (CRS). **International Discussions Concerning Lethal Autonomous Weapon Systems**. Washington, D.C.: Library of Congress, 2025. Disponível em: <https://www.congress.gov/crs-product/IF11294>. Acesso em: 15 set. 2025.

CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE (CRS). **Unmanned Aircraft Systems: Current and Potential Programs**. Washington, DC: CRS, 2022. Disponível em: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R47067>. Acesso em: 19 out. 2025.

COPPE/UFRJ. **Coppe desenvolve sistemas de controle para monitoramento offshore com veículos autônomos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, s.d. Disponível em: <https://coppe.ufrj.br/planeta-coppe/coppe-desenvolve-sistemas-de-controle-para-monitoramento-offshore-com-veiculos-autonomos/>. Acesso em: 10 set. 2025.

CSET. CENTER FOR SECURITY AND EMERGING TECHNOLOGY. **China's National Cybersecurity Center**: a base for military-civil fusion in the cyber domain. Washington, DC: Georgetown University, 2020. Disponível em: <https://cset.georgetown.edu/publication/chinas-national-cybersecurity-center/>. Acesso em: 1 mar. 2025

CUMMINGS, M. L. Artificial Intelligence and the Future of Warfare. **London: Chatham House**, 2017. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2017-01-26-artificial-intelligence-future-warfare-cummings-final.pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.

DEFENSE ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY (DARPA). **Offensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET)** - program page. 2021a. Disponível em: <https://www.darpa.mil/program/offensive-swarm-enabled-tactics>. Acesso em: 1 set. 2025.

DEFENSE ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY (DARPA). **OFFSET Swarms Take Flight in Final Field Experiment**. 29 jun. 2021b. Disponível em: <https://www.darpa.mil/news/2021/offset-swarms-take-flight>. Acesso em: 1 set. 2025.

DEFESA AÉREA & NAVAL. **Insitu fornecerá serviços de UAVs ScanEagle para a Marinha do Brasil**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/defesa/insitu-subsidiaria-da-boeing-fornecera-servicos-de-uavs-scanegle-para-a-marinha-do-brasil>. Acesso em: 10 set. 2025.

DEVITT, Susannah Kate. **Meaningful human command**: Advance control directives as a method to enable moral and legal responsibility for autonomous weapons systems. ArXiv, 13 mar. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2303.06813>. Acesso em: 14 set. 2025.

DJI. Matrice 300 RTK – **Product specifications**. Shenzhen: DJI, 2023. Disponível em: <https://www.dji.com/matrice-300>. Acesso em: 7 set. 2025.

DOCHERTY, Bonnie. **Heed the Call**: A Moral and Legal Imperative to Ban Killer Robots. New York: Human Rights Watch, 2018. Disponível em: <https://www.hrw.org/report/2018/08/21/heed-call/moral-and-legal-imperative-ban-killer-robots>. Acesso em: 12 jan. 2025.

DSTL. **Defence Science and Technology Laboratory**. Londres: Ministry of Defence, s.d. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/organisations/defence-science-and-technology-laboratory>. Acesso em: 20 fev. 2025.

ELBIT SYSTEMS (ELISRA). **COMINT and COMJAM: advanced solutions for unmanned aerial systems (UAS)**. Haifa: Elbit Systems, s.d. Disponível em: <https://elbitsystems.com/unmanned/aerial/uav-payloads/comint-and-comjam>. Acesso em: 25 jan. 2025.

EDA. **EDA-led project shapes standards for unmanned systems**. Bruxelas: European Defence Agency, 12 jul. 2023. Disponível em: <https://eda.europa.eu/news-and-events/news/2023/07/12/eda-led-project-shapes-standards-for-unmanned-systems>. Acesso em: 27 jun. 2025.

EMA-415. **Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil**. 2. rev. Brasília: Marinha do Brasil, 2024.

EPFL. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. BioRobotics Laboratory. **Publications 2011**. Lausanne, 2011. Disponível em: <https://www.epfl.ch/labs/biorob/publications/publications-2011/>. Acesso em: 14 mai. 2025.

EPFL. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. **Robotics at EPFL**. Lausanne, 2012. Disponível em: <https://www.epfl.ch/research/domains/robotics/>. Acesso em: 14 mai. 2025.

ESCOLA NACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA (ENAP). **Elaboração de uma estrutura analítica do projeto (EAP)**. Brasília: ENAP, 2014. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/1107/1/GerenciaDeProjeos_modulo_5_final_.pdf. Acesso em: 25 jan. 2025.

ETH. EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE ZÜRICH. Autonomous Systems Lab. **Autonomous Systems Lab (ASL)**. Zurich, 2025. Disponível em: <https://asl.ethz.ch/>. Acesso em: 14 mai. 2025.

ETZKOWITZ, Henry; ZHOU, Chunyan. **Hélice Tríplice: inovação e empreendedorismo universidade–indústria–governo**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 31, n. 90, p. 23–48, 2017. DOI: 10.1590/S0103-40142017.3190003.

FALCONE, R.; CASTELFRANCHI, C. Levels of Delegation and Levels of Adoption as the Basis for Adjustable Autonomy. **Lecture Notes in Artificial Intelligence**, n. 1792, p. 285–296, 2000.

FAPESP. O Voo do Falcão. São Paulo, [s. d.]. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-voo-do-falcao/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

FAYYAD, J.; JARADAT, M. A.; GRUYER, D.; NAJJARAN, H. **Deep Learning Sensor Fusion for Autonomous Vehicle Perception and Localization: A Review**. Sensors, v. 20, n. 15, art. 4220, 2020. DOI: 10.3390/s20154220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/15/4220>. Acesso em: 11 set. 2025.

FELDMAN, Philip; DANT, Aaron; MASSEY, Aaron. Integrating Artificial Intelligence into Weapon Systems. arXiv, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1905.03899>. Acesso em: 12 ago. 2025.

FERNANDES, Rigel; APOLINARIO, José A.; RAMOS, Antonio L. L. Bearings-only aerial shooter localization using a microphone array mounted on a drone. **IEEE 8th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)**, Bariloche, Argentina, pp. 1–4, doi: 10.1109/LASCAS.2017.7948081. 2017.

FOURLAS, G. K.; KOURKOULIS, S. K.; PARASKEVOPOULOU, E.; TSOURVELOUDIS, N. C. A Survey on Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Techniques for Unmanned Aerial Vehicles. **Machines**, v. 9, n. 9, art. 197, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-1702/9/9/197>. Acesso em: 10 mar. 2025.

FRANTZMAN, Seth J. **How Israel is preparing the next generation of cyber soldiers.** Defense News, Washington, 29 nov. 2022. Disponível em: <https://www.defensenews.com/interviews/2022/11/29/how-israel-is-preparing-the-next-generation-of-cyber-soldiers/>. Acesso em: 5 fev. 2025.

FUNDAÇÃO ALEXANDRE DE GUSMÃO (FUNAG). **Rio Seminar on Autonomous Weapons Systems:** Seminário Internacional sobre Sistemas de Armas Autônomas. Rio de Janeiro, 20 fev. 2020. 1. ed. Brasília: FUNAG, 2020. 321 p. ISBN 978-65-87083-30-8. Disponível em: https://www.funag.gov.br/biblioteca-nova/produto/1-706-cadernos_do_chdd_ano_1_numero_2_primeiro_semestre_de_2003. Acesso em: 22 ago. 2025.

GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, INC. **Lynx® multi-mode radar.** Poway, CA: General Atomics Aeronautical Systems, 2023. Disponível em: <https://ga-asi.com/radars/lynx-multi-mode-radar>. Acesso em: 12 jan. 2025.

GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, INC. **MQ-9B SeaGuardian:** Maritime Capabilities Brief. Poway, 2025a. Disponível em: <https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9b-seaguardian>. Acesso em: 9 set. 2025.

GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS, INC. **MQ-9A Reaper.** 2025b. Disponível em: <https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9a>. Acesso em: 13 set. 2025.

GALLIOTT, Jai C. **Military Robots: Mapping the Moral Landscape.** London: Routledge, 2015.

GERMANY. Federal Government. **Commentary on the Guiding Principles of the Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems (LAWS).** Berlin: Federal Foreign Office, 2020. Disponível em: <https://documents.unoda.org/wp-content/uploads/2020/07/20200626-Germany.pdf>. Acesso em: 14 set. 2025.

GILLI, A. A. Military-technological dependence: lessons of past great-power competitions. **Journal of Strategic Studies**, v. 44, n. 2, p. 287–316, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/01402390.2020.1831448>.

GIRALDO-MARTÍNEZ, G. A. The Triple Helix and its Intervention in the Research and Development of Products for International Security and Defense. **Revista de Relaciones Internacionales, Estrategia y Seguridad**, v. 17, n. 1, p. 31-46, 2022.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. **Deep Learning.** Cambridge: MIT Press, 2016. Disponível em: <https://www.deeplearningbook.org>. Acesso em: 11 set. 2025.

GROVES, Paul D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems.** 2. ed. Boston: Artech House, 2013. Disponível em: <https://books.google.com/books?id=t94fAgAAQBAJ>. Acesso em: 17 abr. 2025.

HARTMANN, Kim; STEUP, Christoph. **The Vulnerability of UAVs to Cyber Attacks – An Approach to the Risk Assessment.** In: PODINS, K.; STINISSEN, J.; MAYBAUM, M. (Org.). *Proceedings of the 5th International Conference on Cyber Conflict (CyCon 2013).* Tallinn:

NATO CCD COE Publications, 2013. Disponível em: https://ccdcoe.org/uploads/2018/10/26_d3r2s2_hartmann.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

HELMER, David; BOARDMAN, Michael; CONROY, S. Kate; HEPWORTH, Adam J.; HARJANI, Manoj. **Human-centred test and evaluation of military AI**. ArXiv, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2412.01978>. Acesso em: 14 set. 2025.

HENSOLDT. **Airborne ESM and SIGINT**. Taufkirchen: HENSOLDT, [s.d.]. Disponível em: <https://www.hensoldt.net/domains/air/reconnaissance/airborne-esm-and-sigint>. Acesso em: 10 jan. 2025.

HERDMAN, Chris M.; KRUK, Ronald V. **Control and application of multiple UAVs in an integrated C4ISR environment**. Ottawa: Carleton University, 2006. Disponível em: https://carleton.ca/ace/wp-content/uploads/Herdman_Kruk_2006_UVS_1.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

HOLLAND, Emily. **Known Unknowns: Data Issues and Military Autonomous Systems**. Geneva: United Nations Institute for Disarmament Research, 2021. Disponível em: <https://unidir.org/publication/known-unknowns-data-issues-and-military-autonomous-systems>. Acesso em: 15 set. 2025.

HOEKSTRA, Willem E. **Tactical data links and interoperability: the glue between systems**. The Hague: NATO Consultation, Command and Control Agency, 2000. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADP010859.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2025.

HOROWITZ, Michael. **The Ethics & Morality of Robotic Warfare: Assessing the Debate over Autonomous Weapons**. Daedalus, v. 145, n. 4, p. 25-36, 2016. Disponível em: https://www.amacad.org/sites/default/files/publication/downloads/004_DAED_a_00409-pp025-036.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

HUMAN RIGHTS WATCH. **Heed the Call: A Moral and Legal Imperative to Ban Killer Robots**. New York: Human Rights Watch, 2018. Disponível em: <https://www.hrw.org/report/2018/08/21/heed-call/moral-and-legal-imperative-ban-killer-robots>. Acesso em: 14 set. 2025.

IAI – ISRAEL AEROSPACE INDUSTRIES. **Avionics, IAI's partner, enters the Brazilian UAVs market with the Caçador**. [S. l.]: IAI, 2015. Disponível em: <https://www.iai.co.il/press/avionics-iais-partner-enters-the-brazilian-uavs-market-with-the-cacador/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

IAI – ISRAEL AEROSPACE INDUSTRIES. **First flight of the Brazilian Caçador MALE UAV**. [S. l.]: IAI, 2016. Disponível em: <https://www.iai.co.il/press/first-flight-of-the-brazilian-cacador-male-uav-by-avionics-services-iais-affiliated-company/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

IAI – ISRAEL AEROSPACE INDUSTRIES. **IAI Harop**. Disponível em: <https://www.iai.co.il/p/harop>. Acesso em: 13 set. 2025.

ICCT – International Centre for Counter-Terrorism. VEILLEUX-LEPAGE, Yannick; DAYMON, Chelsea; ARCHAMBAULT, Ewan. **State Violent Drone Use in the Middle**

East. Haia: ICCT, 2022. Disponível em: <https://icct.nl/sites/default/files/2022-12/Drones%20in%20the%20Middle%20East%20-%20Full%20Report%20Final%20-%20Ready%20to%20Publish.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

INSITU. ScanEagle® Product Card. Bingen, WA: Insitu Inc., 2025. Disponível em: https://www.insitu.com/wp-content/uploads/2025/04/ScanEagle_ProductCard_DU040825.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

INSS – Institute for National Security Studies. HADAD, Sasson; FADLON, Tomer; EVEN, Shmuel (eds.). **Israel's Defense Industry and U.S. Security Aid (INSS Memorandum 202).** Tel Aviv: INSS, 2020. Disponível em: https://www.inss.org.il/wp-content/uploads/2020/08/Memo202_e.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Circular 328: **Unmanned Aircraft Systems (UAS).** Montreal: ICAO, 2011.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS).** Doc 10019. Montreal: ICAO, 2015. Disponível em: <https://store.icao.int/en/manual-on-remotely-piloted-aircraft-systems-rpas-doc-10019>. Acesso em: 10 set. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Unmanned Aircraft Systems (UAS).** Circular 328-AN/190. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2011.

ISMAIL, Norliza; MOHD KAMAL, Nadhiya Liyana; NORHASHIM, Nurhakimah; ABDUL HAMID, Sabarina; SAHWEE, Zulhilmy; AHMAD SHAH, Shahrul. **Electric Propulsion and Hybrid Energy Systems for Solar-Powered UAVs: Recent Advances and Challenges.** Drones, v. 9, n. 12, e846, 2025. DOI: 10.3390/drones9120846. Acesso em: 30 nov. 2025.

ISRAEL. Ministry of Defense. Directorate of Defense Research and Development (DDR&D). About DDR&D. Tel Aviv, s.d. Disponível em: <https://ddrd-mafat.mod.gov.il/en/about>. Acesso em: 20 jun. 2025.

JANSSEN, Malte; PFANDZELTER, Tobias; WANG, Minghe; BERMBACH, David. *Supporting UAVs with edge computing: a review of opportunities and challenges.* Berlin: TU Berlin; Einstein Center Digital Future (ECDF), Mobile Cloud Computing Research Group, 2023. (Technical Report MCC.2023.3).

JAPCC – JOINT AIR POWER COMPETENCE CENTRE. JAPCC Annual Report 2023. Kalkar: Joint Air Power Competence Centre, 2023. Disponível em: <https://www.japcc.org>. Acesso em: 7 out. 2025.

KALLENBORN, Zachary. InfoSwarms: **Drone Swarms and Information Warfare.** Parameters, v. 52, n. 2, p. 87–102, 2022. Disponível em: <https://press.armywarcollege.edu/parameters/vol52/iss2/13/>. Acesso em: 1 set. 2025.

KALLENBORN, Zachary. **The Era of the Drone Swarm Is Coming, and We Need to Be Ready.** Modern War Institute, West Point, 2018. Disponível em: <https://mwi.westpoint.edu/era-drone-swarm-coming-need-ready/>. Acesso em: 13 set. 2025.

KANIA, Elsa B. In **Military-Civil Fusion, China Is Learning Lessons from the United States and Starting to Innovate**. Washington, DC: CNAS, 2019. Disponível em: <https://www.cnas.org/publications/commentary/in-military-civil-fusion-china-is-learning-lessons-from-the-united-states-and-starting-to-innovate>. Acesso em: 13 set. 2025.

KHAN, S. Z.; MOHSIN, M.; IQBAL, W. On GPS Spoofing of Aerial Platforms: A Review of Threats, Challenges, Methodologies, and Future Research Directions. **PeerJ Computer Science**, v. 7, e507, 2021. DOI: 10.7717/peerj-cs.507. Disponível em: <https://peerj.com/articles/cs-507/>. Acesso em: 11 set. 2025.

KHURANA, Ryan. **In Defense of Autonomous Weapons**. The National Interest, 15 out. 2018. Disponível em: <https://nationalinterest.org/feature/defense-autonomous-weapons-33201>. Acesso em: 14 set. 2025.

KOUBAA, Anis; QURESHI, Basem; SRAIRI, Abderrahmane; ALI, Tarek Ben; ALENEZI, Mohammed; ALHARBI, Khalid; ALFARRAJ, Osama. **AERO: AI-enabled remote sensing observation with onboard edge computing in UAVs**. Remote Sensing, v. 15, n. 7, p. 1873, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15071873>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/7/1873>. Acesso em: 19 mai. 2025.

L3HARRIS TECHNOLOGIES, INC. **WESCAM MX™-15: fully digital, high definition**. Melbourne, FL: L3Harris, 2021. Disponível em: <https://www.l3harris.com/sites/default/files/2021-05/WESCAM%20MX-15-0503AA-Sell.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

LAGUNAS, Eva; CHATZINOTAS, Symeon; OTTERSTEN, Björn. Low-Earth orbit satellite constellations for global communication network connectivity. **Nature Reviews Electrical Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s44287-024-00088-9>. Acesso em: 20 mai. 2025.

LECUN, Yann; BENGIO, Yoshua; HINTON, Geoffrey. **Deep Learning**. Nature, v. 521, p. 436-444, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277411157_Deep_Learning. Acesso em: 13 set. 2025.

LIMA FILHO, Geraldo Mulato; MEDEIROS, Felipe L. L.; PASSARO, Angelo. Decision Support System for Unmanned Combat Air Vehicle in Beyond Visual Range Air Combat Based on Artificial Neural Networks. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 13, e3721, 2021. Disponível em: <https://jatm.com.br/jatm/article/download/1228/908/6064>. Acesso em: 1 set. 2025.

LIU, Yunxiao; WANG, Yiming; LI, Han; AI, Jianliang. **Runway-free recovery methods for fixed-wing UAVs**. Drones, v. 8, n. 9, art. 463, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/9/463>. Acesso em: 30 jan. 2025.

MAGNOLI, Demétrio. No espelho da guerra. In: MAGNOLI, Demétrio (org.). **História das guerras**. 3. ed. São Paulo: Contexto, 2006.

MARINHA DO BRASIL. Agência Marinha de Notícias. **Novo drone da Marinha amplia serviços de busca e salvamento marítimo**. 12 out. 2024. Disponível em: <https://www.agencia.marinha.mil.br/defesa-naval/novo-drone-da-marinha-amplia-servicos-de-busca-e-salvamento-maritimo>. Acesso em: 1 set. 2025.

MARINHA DO BRASIL. Escola de Guerra Naval (EGN). **A Implementação de Sistemas Não Tripulados na MB. Rio de Janeiro**: EGN, 2023a. Trabalho do Curso de Política e Estratégia Marítima (C-PEM).

MARINHA DO BRASIL. **RQ-1 ScanEagle**. [S. l.]: Marinha do Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/meios-navais/rq1-scan-eagle>. Acesso em: 11 jan. 2025.

MARINHA DO BRASIL. **Plano Estratégico da Marinha (PEM)**. Brasília: MB, 2023b.

MBDA. **MBDA and XMobots sign MoU on UAV integration**. Paris, 2023. Disponível em: <https://www.mbda-systems.com/press-releases/mbda-and-xmobots-sign-mou/>. Acesso em: 10 set. 2025.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016–2022** (Sumário Executivo). Brasília: MCTI, 2016. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/Arquivos/PlanosDeAcao/PACTI_Sumario_executivo_Web.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

MINERVA AERODESIGN (LabMFA/COPPE-UFRJ). **Minerva Aerodesign - desenvolvimento de UAVs embarcados na COPPE/UFRJ**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, s.d. Disponível em: <https://labmfa.coppe.ufrj.br/aerodesign>. Acesso em: 1 set. 2025.

MITRE. **Mission assurance: concepts and approaches**. McLean, VA: MITRE, 2011. Disponível em: https://www.mitre.org/sites/default/files/media/publication/11_4436_2.pdf. Acesso em: 28 set. 2025.

MOREIRA, William de Sousa. **Ciência e Poder: O Cerceamento Tecnológico e as Implicações para a Defesa Nacional**. Tese (Doutorado em Ciência Política). UFF, 2013. Disponível em: <https://dcp.uff.br/wp-content/uploads/sites/327/2020/10/Tese-de-2013-William-de-Sousa-Moreira.pdf>. Acesso em: 1 set. 2025.

MOURA, José Augusto Abreu de. **A tecnologia e a guerra no mar**. In: ALMEIDA, Francisco E. Alves de; MOREIRA, William de Sousa. *Estudos Marítimos: visões e abordagens*. Rio de Janeiro: Editora Humanitas, p. 317-354, 2019.

MÜLLER, Wilmoth; SEGOR, Florian; MÜHLENBERG, Dirk; DRIESSEN, Bart; DE GEUS, Vincent; PAPP Zita; SVENMARCK Peter; KALIS Antonis; AMDITIS Angelos. *Interoperability of armed forces unmanned systems: the INTERACT project*. Proceedings of SPIE – Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation, v. 12544, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2663145>. Acesso em: 26 jun. 2025.

MURRAY, Charles A.; COX, Catherine B. **Apollo: the race to the moon**. New York: Simon & Schuster, 1989. 506 p.

NASCIMENTO, Vinicius Dalto do. Detecção de atividades ilegais de embarcações através da fusão de comportamentos e regras baseadas no conhecimento do especialista. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação). Disponível em: <https://www.cos.ufrj.br/uploadfile/publicacao/3211.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA work breakdown structure (WBS) handbook**. Washington, DC: NASA, 2025. Disponível em: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2025/06/nasa-wbs-handbook.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2025.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: Volume I – Terminology**. Versão 1.1. Gaithersburg, MD: NIST, 2004. Disponível em: <https://www.nist.gov/document/nistsp1011-i-2-0pdf>. Acesso em: 14 set. 2025.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework: Volume II – Framework Models**. Version 1.0. Gaithersburg, MD: NIST, 2007. (NIST Special Publication 1011-II-1.0). Disponível em: <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1011-II-1.0>. Acesso em: 15 set. 2025.

NEWCOME, Laurence R. **Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles**. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

NOONE, Gregory P.; NOONE, Diana C. The debate over autonomous weapons systems. **Case Western Reserve Journal of International Law**, v. 47, n. 1, p. 25-35, 2015. Disponível em: <https://scholarlycommons.law.case.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1005&context=jil>. Acesso em 12 jan. 2025.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION (NATO). **Science and Technology Organization. Advances in Autonomous Maritime Systems**. Brussels: NATO, 2020. Disponível em: <https://www.sto.nato.int/publications>. Acesso em: 9 set. 2025.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION (NATO). **Science & Technology Trends 2020–2040: Exploring the S&T Edge**. Brussels: NATO Science & Technology Organization, 2020. Disponível em: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2020/4/pdf/190422-ST_Tech_Trends_Report_2020-2040.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

NORTH ATLANTIC TREATY ORGANIZATION (NATO). **STANAG 5516: Tactical Data Exchange – Link 16**. Brussels: NATO Standardization Office, s.d.

NUNES, Diogo M.; BEZERRA, Alan C.; BARROS, Wik M. S.; ARAÚJO, Paulo V. N.; BRANCO-NUNES, Ilka S. L.; MAGRIS, Rafael A.; PEREIRA, Pedro H. C.; NORMANDE, Iran C.; BARBOZA, Rafael S. L.; CARDOSO, Andrei T. C. **Evidence of illegal fishing within the largest Brazilian coastal MPA: Turning a blind eye to the obvious**. *Marine Policy*, v. 148, 2023, 105324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105324>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X22003712>. Acesso em: 14 set. 2025.

NVIDIA CORPORATION. **NVIDIA Jetson Orin NX series modules: datasheet**. Santa Clara, CA: NVIDIA, 2025. Disponível em: <https://developer.nvidia.com/embedded/downloads>. Acesso em: 5 fev. 2025.

ODIN/TRADOC – U.S. Army Training and Doctrine Command. **Bayraktar TB2** (Turkish MALE UCAV). 10 jun. 2024. Disponível em: [https://odin.tradoc.army.mil/WEG/Asset/Bayraktar_TB2_Turkish_Medium_Altitude_Long_Endurance_\(MALE\)_Unmanned_Combat_Aerial_Vehicle_\(UCAV\)](https://odin.tradoc.army.mil/WEG/Asset/Bayraktar_TB2_Turkish_Medium_Altitude_Long_Endurance_(MALE)_Unmanned_Combat_Aerial_Vehicle_(UCAV)). Acesso em: 13 set. 2025.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Global value and supply chains**. Paris: OECD, 2025. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/topics/global-value-and-supply-chains.html>. Acesso em: 22 jun. 2025.

OETTERS HAGEN, P.; MELZER, A.; MANTEL, T. **Perpetual Flight with a Small Solar-Powered UAV**: Flight Results, Performance Analysis and Model Validation. 2016 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2016. DOI: 10.1109/AERO.2016.7500855.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Convention on Certain Conventional Weapons (CCW). **Report of the 2019 session of the Group of Governmental Experts on Emerging Technologies in the Area of Lethal Autonomous Weapons Systems** (CCW/GGE.1/2019/3). Genebra: ONU, 2019. Disponível em: https://documents.unoda.org/wp-content/uploads/2020/09/CCW_GGE.1_2019_3_E.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Convention on Certain Conventional Weapons (CCW). **Report of the 2021 session of the Group of Governmental Experts on Emerging Technologies in the Area of Lethal Autonomous Weapons Systems** (CCW/GGE.1/2021/3). Geneva: United Nations, 2021. Disponível em: https://docs-library.unoda.org/Convention_on_Certain_Conventional_Weapons_-_Seventh_Group_of_Governmental_Experts_%282021%29/CCW-GGE-1-2021-3_English.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Lethal autonomous weapons systems: report of the Secretary-General**. New York: United Nations, 2024. Documento A/79/88. Disponível em: docs.un.org/en/A/79/88. Acesso em: 18 mar. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Security Council. **Final report of the Panel of Experts on Yemen established pursuant to Security Council resolution 2140** (2014). New York: UN, 25 jan. 2022. (S/2022/50). Disponível em: https://www.securitycouncilreport.org/atf/cf/%7B65BFCF9B-6D27-4E9C-8CD3-CF6E4FF96FF9%7D/S_2022_50.pdf. Acesso em: 3 set. 2025.

PARASURAMAN, Raja; SHERIDAN, Thomas B.; WICKENS, Christopher D. A model for types and levels of human interaction with automation. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans**, v. 30, n. 3, p. 286–297, 2000. doi:10.1109/3468.844354.

PARK, Youngwook. **Will the One Ring Hold? Defense AI in South Korea**. Hamburg: Defense AI Observatory, 2024. (DAIO Study, 24/21). Disponível em: <https://defenseai.eu/wp->

content/uploads/2024/02/daio_study2421_will_the_one_ring_hold_youngwook_park.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

PAX. Conflicted intelligence: how universities can help prevent the development of lethal autonomous weapons. Utrecht: PAX, 2020. Disponível em:

<https://paxforpeace.nl/publications/conflicted-intelligence/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PAX. Don't be evil? A survey of the tech sector's stance on lethal autonomous weapons.

Utrecht: PAX, 2019a. Disponível em: <https://paxforpeace.nl/publications/dont-be-evil/>.

Acesso em: 10 jul. 2025.

PAX. The state of AI: artificial intelligence, the military and increasingly autonomous weapons. Utrecht: PAX, 2019b. Disponível em: <https://paxforpeace.nl/publications/the-state-of-ai/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PAX. Turkey's military build-up: arms transfers and an emerging military industry. Utrecht: PAX for Peace, 2017. Disponível em: <https://paxforpeace.nl/wp-content/uploads/sites/2/2020/11/paxreportturkijefinaldigisinglepage.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

PERIA-PEIGNÉ, E. **Turkey's drones: autonomy, proliferation and warfighting.** Paris: IFRI, 2023. Disponível em: <https://www.ifri.org/>. Acesso em: 9 set. 2025.

PÉRIA-PEIGNÉ, Léo. **TB2 Bayraktar: Big Strategy for a Little Drone.** Paris: IFRI, 2023. Disponível em: <https://www.ifri.org/en/memos/tb2-bayraktar-big-strategy-little-drone>. Acesso em: 13 set. 2025.

PICKRELL, Ryan. **China is practicing unleashing swarms of suicide drones from the backs of trucks.** Business Insider, 16 out. 2020. Disponível em: <https://www.businessinsider.com/china-test-launched-swarm-of-suicide-drones-from-a-truck-2020-10>. Acesso em: 1 set. 2025.

PLICHTA, Mykhaylo. Precise Mass in Action: Assessing Ukraine's One-Way Attack Drone Campaign against Russia. **The RUSI Journal**, v. 170, n. 4, p. 42–48, 2025. Disponível em: <https://research-repository.st-andrews.ac.uk/bitstream/handle/10023/32577/Plitchta-2025-Precise-mass-action-RUSIJ-170-42-CCBYNCND.pdf;jsessionid=B5744F5429E06878E0ECC608A91EA553?sequence=1>. Acesso em: 3 set. 2025.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Practice standard for work breakdown structures.** 3. ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, 2019.

QIN, Tong; LI, Peiliang; SHEN, Shaojie. VINS-Mono: a robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 34, n. 4, p. 1004–1020, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2853729>. Acesso em: 19 jun. 2025.

RAMACHANDRAN, Prakash; SUNKU, Ranganath; BHANDARU, Malini; TIBREWALA, Sujata. A survey of AI-enabled edge computing for future networks. In: **IEEE 5G World Forum (5GWF)**, 2021, Montreal. Anais do IEEE 5G World Forum (5GWF). New York: IEEE, 2021. p. 459–463. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9605058>. Acesso em: 20 jan. 2025.

REPUBLIC OF KOREA. Government. Ministry of Science and ICT. **National Strategy for Artificial Intelligence**. Sejong, 2019. Disponível em: https://wp.oecd.ai/app/uploads/2021/12/Korea_National_Strategy_for_Artificial_Intelligence_2019.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

REUTERS. **EMBRAER decide desfazer joint-venture para aeronaves não tripuladas**. Reuters, 7 jan. 2016. Disponível em: <https://www.reuters.com/article/business/embraer-decide-desfazer-joint-venture-para-aeronaves-no-tripuladas-idUSKBN0UL1C1>. Acesso em: 11 jan. 2025.

REUTERS. Turkey's Bayraktar drones transform modern warfare. **Londres: Reuters**, 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/>. Acesso em: 9 set. 2025.

REVELS, Matthew. How will automation change ground warfare? **Georgetown Security Studies Review**, Washington, DC, 2023.

ROFF, Heather M. The Strategic Robot Problem: Lethal Autonomous Weapons in War. **Journal of Military Ethics**, 2014. Disponível em <https://philpapers.org/rec/ROFTSR>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ROSTEC. **Rostec to Start Serial Production of Okhotnik Heavy Attack Drones in 2023**. 18 maio 2022. Disponível em: <https://rostec.ru/en/media/pressrelease/rostec-to-start-serial-production-of-okhotnik-heavy-attack-drones-in-2023/>. Acesso em: 13 set. 2025.

RUSI – Royal United Services Institute. WATLING, J.; REYNOLDS, N. Meatgrinder: **Russian tactics in the second year of its invasion of Ukraine**. Londres: RUSI, 2023. Disponível em: <https://rusi.org/explore-our-research/publications/special-resources/meatgrinder-russian-tactics-second-year-its-invasion-ukraine>. Acesso em: 9 set. 2025.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 4. ed. Hoboken: Pearson, 2021.

SAHIN, Erol. **Swarm robotics**: From sources of inspiration to domains of application. In: ŞAHIN, Erol; SPEARS, William M. (ed.). *Swarm Robotics*. Berlin: Springer, 2005. p. 10–20. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_2

SAMARAS, S. **Deep Learning on Multi Sensor Data for Counter UAV Applications - A Systematic Review**. *Sensors*, v. 19, n. 22, art. 4837, 2019. DOI: 10.3390/s19224837. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6891421/>. Acesso em: 11 set. 2025.

SAYLER, Kelley M. Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress (R46458). **Congressional Research Service**, 22 fev. 2024. Disponível em: <https://sgp.fas.org/crs/natsec/R46458.pdf>. Acesso em: 1 set. 2025.

SCHARRE, Paul. **Army of none: Autonomous weapons and the future of war**. New York: W. W. Norton, 2018.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

SHAFIQUE, Arslan; MEHMOOD, Abid; ELHADEF, Mourad. Detecting signal spoofing attack in UAVs using machine learning models. *IEEE Access*, v. 9, p. 93185–93199, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089847>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SHAIKH, Shaan; RUMBAUGH, Wes. **The Air and Missile War in Nagorno-Karabakh: Lessons for the Future of Strike and Defense**. Washington, DC: CSIS, 2020. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/air-and-missile-war-nagorno-karabakh-lessons-future-strike-and-defense>. Acesso em: 1 set. 2025.

SHARKEY, Noel. The Impact of Gender and Race Bias in AI. **IEEE Technology and Society Magazine**, v. 39, n. 1, p. 22-30, 2020.

SHAN, Jie; TOTH, Charles K. (eds.). **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315154381>. Acesso em: 2 abr. 2025.

SHAUKAT, Kamran; LUO, Suhuai; VARADHARAJAN, Vijay; HAMEED, Ibrahim A.; XU, Min. A survey on machine learning techniques for cyber security in the last decade. *IEEE Access*, v. 8, p. 222310–222354, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041951>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SHRESTHA, Sharad; ABABNEH, Mohammed; MISRA, Satyajayant; CATHEY JR., Henry M.; VISHWANATHAN, Roopa; JANSEN, Matt; CHOI, Jinhong; BOBBA, Rakesh; JANG, Yeongjin. **A comprehensive survey of unmanned aerial systems' risks and mitigation strategies**. arXiv preprint, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.10327v1>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SILVA, Alexandre Menezes da. **Sistemas de Armas Autônomas Letais**. Rio de Janeiro: Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, 2022. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/11877/1/MO%206701%20-%20ALEXANDRE%20Menezes%20da%20SILVA.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

SIPRI – Stockholm International Peace Research Institute. **Arms Transfers Database**. Estocolmo: SIPRI, 2022. Disponível em: <https://www.sipri.org/databases/armstransfers>. Acesso em: 9 set. 2025.

SIPRI – Stockholm International Peace Research Institute. **What drove a recent wave of arms industry consolidation?** Stockholm: SIPRI, 24 jun. 2025. Disponível em: <https://www.sipri.org/commentary/topical-backgrounder/2025/what-drove-recent-wave-arms-industry-consolidation>. Acesso em: 3 set. 2025.

STE. **Synthetic Training Environment: Overview**. Institute for Creative Technologies. Playa Vista, CA, 2018. Disponível em: https://ict.usc.edu/wp-content/uploads/2021/09/STE_Overview.pdf. Acesso em: 12 jul. 2025

STELLA TECNOLOGIA. **Atobá**. São José dos Campos, 2024. Disponível em: <https://www.stellatecnologia.com/atoba/>. Acesso em: 10 set. 2025.

SUNG, Y.-H. **GPS Spoofing Detection Method for Small UAVs Using 1D CNN**. *Sensors*, v. 22, n. 23, art. 9412, 2022. DOI: 10.3390/s22239412. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9412>. Acesso em: 11 set. 2025.

TADDEO, Mariarosaria; BLANCHARD, Alexander. **A Comparative Analysis of the Definitions of Autonomous Weapons Systems**. *Science and Engineering Ethics*, v. 28, n. 37, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11948-022-00392-3>. Acesso em: 1 set. 2025.

TECNODEFESA. **Atobá XR, o novo VANT da Stella Tecnologia**. Tecnodefesa, 2024. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/exclusivo-atoba-xr-o-novo-vant-da-stella-tecnologia/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

THE OPEN GROUP. Technical standard for SOSA™ reference architecture. San Francisco: The Open Group, 2021. Disponível em: <https://publications.opengroup.org/c212>. Acesso em: 12 jul. 2025.

TIJTGAT, Nils; VAN RIE, Jelle; VERMEULEN, Ben; BERSCH, Carl; BOUTTE, Wim; HELSEN, Joris. Embedded real-time object detection for a UAV warning system. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*. Venice: IEEE, 2017. p. 2110–2118. Disponível em: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2017_workshops/papers/w30/Tijtgat_Embedded_Real-Time_Object_ICCV_2017_paper.pdf. Acesso em: 10 ago. 2025.

TRADE.GOV. **Israel – Selling to the Public Sector**. Washington, DC: International Trade Administration, 2023. Disponível em: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/israel-selling-public-sector>. Acesso em: 20 mar. 2025.

UNIDIR – United Nations Institute for Disarmament Research. **Artificial Intelligence Beyond Weapons: Application and Impact of AI in the Military Domain**. Geneva: UNIDIR, 2023a. Disponível em: https://unidir.org/wp-content/uploads/2023/10/UNIDIR_AI_Beyond_Weapons_Application_Impact_AI_in_the_Military_Domain.pdf.

UNIDIR – United Nations Institute for Disarmament Research. **Proposals Related to Emerging Technologies in the Area of Lethal Autonomous Weapons Systems: A Resource Paper** (updated). Geneva: UNIDIR, 2023b. Disponível em: <https://unidir.org/publication/proposals-related-to-emerging-technologies-in-the-area-of-lethal-autonomous-weapons-systems-a-resource-paper-updated/>. Acesso em: 15 set. 2025.

UNIDIR – United Nations Institute for Disarmament Research. **The Weaponization of Increasingly Autonomous Technologies: Considering Ethics and Social Values**. Geneva: UNIDIR, 2015. Disponível em: <https://unidir.org/publication/weaponization-increasingly-autonomous-technologies-considering-ethics-and-social-values>. Acesso em: 14 set. 2025.

UNIDIR – United Nations Institute for Disarmament Research. **UNIDIR on Lethal Autonomous Weapons: Mapping our Research to the Discussions of the GGE on LAWS**. Geneva: UNIDIR, 2021. Disponível em: <https://unidir.org/wp-content/uploads/2021/06/UNIDIR-on-Lethal-Autonomous-Weapons-Mapping-our-Research-to-the-Discussions-of-the-GGE-on-LAWS.pdf>.

content/uploads/2023/05/UNIDIR-on-Lethal-Autonomous-Weapons-Final.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

UNITED KINGDOM. Ministry of Defence. **Defence Artificial Intelligence Strategy**. London: UK MoD, 2022. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/defence-artificial-intelligence-strategy>. Acesso em: 14 set. 2025.

UNITED KINGDOM. Ministry of Defence. **Defence Command Paper 2023**: Defence's response to a more contested and volatile world. London: MoD, 2023. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/64b55dd30ea2cb000d15e3fe/Defence_Command_Paper_2023_Defence_s_response_to_a_more_contested_and_volatile_world.pdf. Acesso em: 3 set. 2025.

UNITED STATES. Department of Commerce. **Export administration regulations (EAR)**. Washington, DC, 2024b. Disponível em: <<https://www.ecfr.gov/current/title-15/subtitle-B/chapter-VII/subchapter-C>>. Acesso em: 21 jan. 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. Directive 3000.09: **Autonomy in Weapon Systems**. Washington, D.C.: DoD, 2012. Incorporating Change 1, 2017. Disponível em: <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodd/300009p.pdf>. Acesso em: 14 set. 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. **MIL-STD-810H**: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests. Washington, DC: DoD, 2019. Disponível em: https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=36001. Acesso em: 9 set. 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering (OUSD[R&E]). **Implementing a modular open systems approach in Department of Defense programs**. Washington, DC: Department of Defense, 2025b. Disponível em: <https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2025/03/MOSA-Implementation-Guidebook-27Feb2025-Cleared.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering (OUSD[R&E]). **Modular Open Systems Approach (MOSA)**. Washington, D.C.: DoD, 2025a. Disponível em: <https://ac.cto.mil/mosa/>. Acesso em: 15 set. 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. **Test Resource Management Center (TRMC)**. National Cyber Range Complex (NCRC). Washington, DC, 2025. Disponível em: <https://www.trmc.osd.mil/ncrc.html>. Acesso em: 4 mar. 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. **Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2011–2036**. Washington, D.C.: DoD, 2011. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA592015.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

UNITED STATES. Department of Defense. **Unmanned systems integrated roadmap 2017–2042**. Washington, DC: Office of the Assistant Secretary of Defense for Acquisition, 2018. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1059546.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2025.

UNITED STATES. Department of State. International traffic in arms regulations (ITAR). Washington, DC, 2024a. Disponível em: <<https://www.ecfr.gov/current/title-22/chapter-I/subchapter-M>>. Acesso em: 20 jan. 2025.

UNITED STATES. Federal Aviation Administration (FAA). **UAS Beyond Visual Line of Sight (BVLOS)** Aviation Rulemaking Committee: Final Report. Washington, D.C.: FAA, 2022. Disponível em: https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/committees/documents/media/UAS_BVLOS_ARC_FINAL_REPORT_03102022.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB). Grupo de Robótica e Automação (GRACO). Disponível em: <https://www.graco.unb.br/>

UNITED STATES. **Intelligence guide**. Washington, DC: U.S. Government Publishing Office, s. d. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-PREX28-PURL-LPS120014/pdf/GOVPUB-PREX28-PURL-LPS120014.pdf>

UNODA – United Nations Office for Disarmament Affairs. **The Impact of Emerging Technologies on International Security and Disarmament**. New York: UNODA, 2023. Disponível em: <https://disarmament.un.org/publications>. Acesso em: 9 set. 2025.

UNODC – UNITED NATIONS OFFICE ON DRUGS AND CRIME. **World Drug Report 2022**. Booklet 1: Executive Summary, Policy Implications. Vienna: UNODC, 2022. Disponível em: https://www.unodc.org/res/wdr2022/MS/WDR22_Booklet_1.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

U.S.-CHINA ECONOMIC AND SECURITY REVIEW COMMISSION. China's military UAV industry. Washington, DC, 14 June 2013. Disponível em: https://www.uscc.gov/sites/default/files/Research/China%27s%20Military%20UAV%20Industry_14%20June%202013.pdf. Acesso em: 12 ma5. 2025.

USAF – United States Air Force. **The future of autonomous systems in the Air Force**. Washington, DC: USAF, 2022. Disponível em: <https://www.af.mil/>. Acesso em: 9 set. 2025.

VMEbus International Trade Association (VITA). ANSI/VITA 65-2017: OpenVPX System Standard. Scottsdale, AZ: VITA Standards Organization, 2017. Disponível em: <https://www.vita.com/>. Acesso em: 15 set. 2025.

VASCONCELOS, Yuri. O Atobá alça voo. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, ed. 299, jan. 2021. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-atoba-alca-voo/>. Acesso em: 15 set. 2025.

VITA. **VITA standards overview**. Scottsdale, AZ: VITA Standards Organization, 2017. Disponível em: <https://www.vita.com/Standards>. Acesso em: 23 mar. 2025.

VERBRUGGEN, Maaïke. **The role of civilian innovation in the development of lethal autonomous weapon systems**. Global Policy, v. 10, n. 3, p. 338–342, 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1758-5899.12663>. Acesso em: 12 dez. 2024.

WANG, B.; SHEN, Y.; ZHANG, Y.; XU, B. **Active Fault-Tolerant Control for a Quadrotor Helicopter Against Actuator Faults and Model Uncertainties**. Aerospace Science and Technology, v. 99, art. 105745, 2020. DOI: 10.1016/j.ast.2020.105745. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105745>.

WASSENAAR ARRANGEMENT. **List of Dual-Use Goods and Technologies and Munitions List. Vienna**: Wassenaar Arrangement Secretariat, 2024. Disponível em: <https://www.wassenaar.org/app/uploads/2024/12/List-of-Dual-Use-Goods-and-Technologies-and-ML-2024.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2025.

WEST POINT – Combating Terrorism Center. **The Rising Threat of Non-State Actor Commercial Drone Use: Emerging Capabilities and Threats**. West Point, 2025. Disponível em: <https://ctc.westpoint.edu/the-rising-threat-of-non-state-actor-commercial-drone-use-emerging-capabilities-and-threats/>. Acesso em: 13 set. 2025.

WILLIAMS, Andrew P.; SCHARRE, Paul D. (org.). **Autonomous Systems: Issues for Defence Policymakers**. Norfolk, VA: Headquarters Supreme Allied Commander Transformation (HQ SACT), 2015. 321 p. (Innovation in Capability Development, v. 2). ISBN 978-92-8450-193-9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282338125_Autonomous_Systems_Issues_for_Defence_Policymakers. Acesso em: 14 set. 2025.

WU, Xiangyu; ZENG, Jun; TAGLIABUE, Andrea; MUELLER, Mark W. **Model-Free Online Motion Adaptation for Energy-Efficient Flights of Multicopters**. IEEE Access, v. 10, p. 65507-65519, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3144321. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2108.03807>. Acesso em: 7 set. 2025.

WU, Y.; YOU, X.; DU, J. **Artificial Intelligence 1.0 to 4.0: Development Stages and Future Prospects**. Frontiers in Artificial Intelligence, v. 8, art. 1585629, 2025. DOI: 10.3389/frai.2025.1585629. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/artificial-intelligence/articles/10.3389/frai.2025.1585629/full>. Acesso em: 11 set. 2025.

WYATT, Austin. **Examining Supply Chain Risks in Autonomous Weapon Systems and Artificial Intelligence**. Applied Cybersecurity & Internet Governance, v. 2, n. 1, p. 84-104, 2023. DOI: 10.60097/ACIG/162874. Disponível em: <https://www.acigjournal.com/pdf-184305-105063?filename=Examining%20Supply%20Chain.pdf>. Acesso em: 14 set. 2025.

XMOBOTS. **Nauru 1000C ISTAR**. [S. l.]: XMobots, [s. d.]. Disponível em: <https://xmobots.com.br/produto/nauru-1000c-istar/>. Acesso em: 11 jan. 2025.

XMOBOTS. **Drone Nauru 1000C participa de primeira missão oficial no Exército Brasileiro**. MundoGEO, São Paulo, 09 jan. 2025a. Disponível em: <https://mundogeo.com/2025/01/09/drone-nauru-1000c-participa-de-primeira-missao-oficial-no-exercito-brasileiro/>. Acesso em: 10 out. 2025.

XMOBOTS. **NAURU 500C ISR**. São Carlos: XMobots, 2025b. Disponível em: <https://xmobots.com.br/produto/nauru-500c-isr/>. Acesso em: 1 set. 2025.

XMOBOTS. **Nauru 1000C**. São Carlos: XMobots, 2023. Disponível em: <https://www.xmobots.com.br/nauru-1000c/>. Acesso em: 15 set. 2025.

YANMAZ, Evşen; YAHYANEJAD, Saeed; RINNER, Bernhard; HELLWAGNER, Hermann; BETTSTETTER, Christian. **Drone networks: communications, coordination, and sensing**. *Ad Hoc Networks*, v. 68, p. 1–15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.09.001>. Acesso em: 11 jan. 2025.

YU, Aaron; KOLOTYLO, Iuliia; HASHIM, Hashim A.; ELTOUKHY, Abdelrahman E. E. Electronic warfare cyberattacks, countermeasures, and modern defensive strategies of UAV avionics: a survey. **IEEE Access**, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10965638>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ZHOU, Xiaoteng; LIU, Chun; XUE, Yun; AKBAR, Akram; JIA, Shuo; ZHOU, Yifan; ZENG, Doudou. Radiometric calibration of a large-array commodity CMOS multispectral camera for UAV-borne remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 112, p. 102968, 2022. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102968.

ZOU, Cheng; SUN, Yezhen; KONG, Linghua. Unmanned aerial vehicle landing on rugged terrain by on-board LIDAR–camera positioning system. **Applied Sciences**, v. 14, n. 14, art. 6079, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/14/6079>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ZHANG, Hongrui; WANG, Chao; LI, Yuntao; ZHANG, Yifan. Marine UAV–USV marsupial platform: system and recovery technique. **Applied Sciences**, v. 10, n. 5, art. 1583, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/5/1583>. Acesso em: 30 jan. 2025.

GLOSSÁRIO

ALFUS (<i>Automatic Landing and Follow-Up System</i>)	Sistema automático de pouso e acompanhamento, empregado em plataformas aéreas não tripuladas para executar procedimentos de recuperação e aterrissagem com mínima intervenção humana, contribuindo para a segurança da operação e a redução da carga cognitiva do operador.
Amazônia Azul	Expressão utilizada para designar a extensa área marítima sob jurisdição brasileira, que compreende o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a plataforma continental. O conceito ressalta a relevância estratégica, econômica, ambiental e de soberania desse espaço marítimo para o Estado brasileiro.
Ambiente contestado	Contexto operacional caracterizado pela presença de ameaças que restringem ou degradam a liberdade de ação das forças empregadas, incluindo interferências eletromagnéticas, cibernéticas, cinéticas ou informacionais, capazes de comprometer sensores, comunicações, navegação e sistemas de comando e controle.
Autonomia (em sistemas militares)	Capacidade de um sistema executar funções específicas, como navegação, percepção do ambiente, tomada de decisão ou emprego de meios, com diferentes níveis de intervenção humana, variando desde a supervisão direta até a execução automatizada de tarefas previamente definidas.
Base Industrial de Defesa (BID)	Conjunto de empresas, instituições de pesquisa e organizações industriais responsáveis pelo desenvolvimento, produção, manutenção e suporte de sistemas, equipamentos e tecnologias de interesse da defesa nacional, incluindo aplicações de uso dual civil-militar.
Cerceamento tecnológico	Conjunto de restrições formais ou informais impostas ao acesso, transferência ou desenvolvimento de tecnologias sensíveis, geralmente decorrentes de regimes internacionais de controle, políticas de exportação ou assimetrias no sistema internacional, que afetam a autonomia tecnológica de Estados e organizações.
COMINT (<i>Communications Intelligence</i>)	Subcategoria da inteligência de sinais focada na interceptação e análise de comunicações entre sistemas, plataformas ou operadores, permitindo a obtenção de informações sobre intenções, coordenação e atividades de forças ou organizações monitoradas.
ELINT (<i>Electronic Intelligence</i>)	Subcategoria da inteligência de sinais dedicada à interceptação e análise de emissões eletromagnéticas não associadas a comunicações, como radares e sensores eletrônicos, visando identificar capacidades, padrões de operação e vulnerabilidades de sistemas adversários.
Homem no loop / humano no loop	Modelo de interação entre operadores humanos e sistemas automatizados ou autônomos no qual a decisão final ou a autorização para ações críticas permanece sob controle humano direto, ainda que etapas intermediárias do processo sejam automatizadas.
LIDAR (<i>Light Detection and Ranging</i>)	Tecnologia de sensoriamento remoto que utiliza pulsos de laser para medir distâncias e gerar informações tridimensionais do ambiente, sendo empregada em aplicações de mapeamento, navegação, detecção de obstáculos e percepção do entorno em sistemas aéreos não tripulados.
SIGINT (<i>Signals Intelligence</i>)	Categoria de inteligência voltada à coleta e análise de sinais eletromagnéticos emitidos por sistemas eletrônicos, comunicações ou radares, com o objetivo de apoiar a consciência situacional, a avaliação de ameaças e a tomada de decisão em operações militares.

Sistemas de Armas Autônomas Letais	Sistemas de armas capazes de selecionar e engajar alvos com diferentes graus de autonomia funcional, com base em sensores, algoritmos e sistemas de decisão embarcados, podendo operar com níveis variados de supervisão humana, conforme o conceito de emprego adotado.
Tríplice Hélice	Modelo analítico que descreve a interação entre governo, indústria e academia como vetor para a geração de inovação, desenvolvimento tecnológico e formulação de políticas públicas, especialmente em setores estratégicos e de alta intensidade tecnológica, como o da defesa.
UAV (<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)	Veículo aéreo não tripulado, termo genérico que abrange plataformas aéreas civis e militares de diferentes portes e níveis de complexidade, podendo operar de forma remota ou integrada a sistemas mais amplos de comando, controle e processamento de informações.

APÊNDICE – QUESTIONÁRIO PARA A TRÍPLICE HÉLICE

Setor: Governo/Forças Armadas

1. Qual é a percepção institucional sobre a integração de tecnologias letais autônomas em Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARP) no contexto da Amazônia Azul?
2. Existem diretrizes ou discussões em andamento sobre o uso de autonomia letal em sistemas navais?
3. Quais são os principais desafios técnicos e doutrinários percebidos para a adoção dessas tecnologias?
4. Há iniciativas atuais ou previstas para capacitar pessoal (militar ou civil) em áreas de IA e automação aplicadas à defesa?
5. Considerando a percepção historicamente baixa de ameaça presente na sociedade e na elite política nacional, o(a) senhor(a) considera que os esforços atuais de sensibilização realizados por organizações ligadas ao setor de defesa são eficazes para reforçar a importância do orçamento de defesa?
6. Diante do cenário geopolítico recente, caracterizado por instabilidades e múltiplas potências, qual é a sua avaliação sobre a necessidade de fortalecer a Base Industrial de Defesa e de incentivar a inovação tecnológica aplicada à indústria bélica no Brasil?

Setor: Indústria (BID)

1. Como a sua empresa enxerga as oportunidades e desafios na integração de tecnologias letais autônomas em Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARP)?
2. Existem entraves regulatórios, tecnológicos ou relacionados ao cerceamento tecnológico que limitam o desenvolvimento de sistemas autônomos letais para uso militar?

3. Quais são as principais demandas de suporte institucional (ex.: financiamentos, parcerias, normatização) para viabilizar projetos nessa área?
4. Como a empresa lida com a questão da capacitação de mão de obra em tecnologias sensíveis (IA, enlaces, sensores etc.)?
5. Sua empresa considera viável a adaptação de modelos estrangeiros de SARP armados para uso no Brasil? Qual é a importância dessa estratégia no desenvolvimento nacional?
6. Diante do atual cenário geopolítico multipolar, qual é a sua avaliação sobre a urgência de investimentos na Base Industrial de Defesa e em inovação tecnológica?

Setor: Academia

1. Como a academia avalia a importância da pesquisa aplicada em tecnologias letais autônomas para o setor de defesa?
2. Existem desafios éticos, metodológicos ou políticos que dificultam a participação de pesquisadores em projetos dessa natureza?
3. Quais são as áreas técnicas mais promissoras para o desenvolvimento nacional de Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARP) armados com funções autônomas?
4. Há articulação entre universidades, indústria e Marinha para o desenvolvimento conjunto dessas tecnologias?
5. Como a formação de recursos humanos pode ser adaptada para atender às demandas de defesa em tecnologias sensíveis?