

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CC LEANDRO DE BRITO LANES

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE SISTEMAS NÃO TRIPULADOS EM
MISSÕES DE INTELIGÊNCIA, VIGILÂNCIA E RECONHECIMENTO E
NA INTERAÇÃO COM TROPAS E UNIDADES EM OPERAÇÕES
MILITARES**

Rio de Janeiro

2025

CC LEANDRO DE BRITO LANES

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE SISTEMAS NÃO TRIPULADOS EM
MISSÕES DE INTELIGÊNCIA, VIGILÂNCIA E RECONHECIMENTO E
NA INTERAÇÃO COM TROPAS E UNIDADES EM OPERAÇÕES
MILITARES**

Monografia apresentada à Escola de
Guerra Naval, como requisito parcial
para a conclusão do Curso Superior.

Orientador(a): CF Daniel Drumond
Gama

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval
2025

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

Declaro que este trabalho acadêmico: a) corresponde ao resultado de investigação por mim desenvolvida, enquanto discente da Escola de Guerra Naval (EGN); b) é um trabalho original, ou seja, que não foi por mim anteriormente utilizado para fins acadêmicos ou quaisquer outros; c) é inédito, isto é, não foi ainda objeto de publicação; e d) é de minha integral e exclusiva autoria.

Declaro também que tenho ciência de que a utilização de ideias ou palavras de autoria de outrem, sem a devida identificação da fonte, e o uso de recursos de inteligência artificial no processo de escrita constituem grave falta ética, moral, legal e disciplinar. Ademais, assumo o compromisso de que este trabalho possa, a qualquer tempo, ser analisado para verificação de sua originalidade e ineditismo, por meio de ferramentas de detecção de similaridades ou por profissionais qualificados.

Os direitos morais e patrimoniais deste trabalho acadêmico, nos termos da Lei 9.610/1998, pertencem ao seu Autor, sendo vedado o uso comercial sem prévia autorização. É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos e ideias expressas neste trabalho acadêmico são de responsabilidade do Autor e não retratam qualquer orientação institucional da EGN ou da Marinha do Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Sr. José Norberto Veira Lanes, o qual durante sua vida, e agora ao lado de Deus, sempre foi e será o meu eterno professor, e que em conjunto com minha querida mãe, Sr.a Leonete Cardoso de Brito, são os principais influenciadores e torcedores na minha trajetória profissional e pessoal. Adicionalmente, dedico a minha irmã Érika de Brito Lanes, meu irmão Rodrigo de Brito Lanes e meu sobrinho Gustavo Lanes Carrilho por sempre estarem ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e pela força para sempre seguir em frente na desafiadora jornada do Curso Superior (C-SUP).

Sou muito grato a todos que contribuíram para a conclusão bem sucedida deste trabalho. Meu mais sincero agradecimento ao meu orientador: CF DANIEL Drumond GAMA, por acreditar no meu potencial, pelo imensurável apoio, confiança e paciência no esclarecimento das minhas dúvidas e dificuldades. Sendo crucial para o desenvolvimento desta monografia.

Por fim, mas não menos importante, serei sempre grato à minha mãe Leonete Cardoso de Brito, ao meu pai José Norberto Vieira Lanes, à minha irmã Érika de Brito Lanes, ao meu irmão Rodrigo de Brito Lanes e ao meu sobrinho Gustavo Lanes Carrilho pelo apoio e incentivo.

“Você não pode ter um amanhã melhor se estiver pensando no ontem o tempo todo”.

CHARLES F. KETTERING
in “Prophet of Progress: Selections from
the Speeches of Charles F. Kettering”,
quote page 16, 1961.

RESUMO

Esta monografia investiga o emprego de sistemas não tripulados aéreos, de superfície e subaquáticos em missões de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento, explorando sua evolução, capacidade operacional e impacto nas estratégias militares modernas. O estudo evidencia como esses sistemas ampliam a consciência situacional e potencializam operações sem expor vidas humanas, sendo fundamentais tanto para grandes potências quanto para países com recursos limitados. A pesquisa compara as peculiaridades e desafios de cada domínio: veículos aéreos não tripulados oferecem Inteligência, Vigilância e Reconhecimento tático e estratégico, mas enfrentam limitações em ambientes disputados; veículos de superfície não tripulados despontam como vetores econômicos de patrulha e dissuasão; veículos subaquáticos não tripulados operam discretamente em águas profundas, ideais para vigilância de cabos submarinos e zonas sensíveis. Adicionalmente, são discutidas implicações éticas, legais e tecnológicas, como a dependência de Inteligência Artificial, vulnerabilidades a interferência e a crescente militarização do espaço marítimo e aéreo. Conclui-se que tais sistemas são peças centrais da guerra centrada em redes e informação. No entanto, sua adoção deve ser equilibrada com doutrina, normas internacionais e mecanismos de controle robustos. Este trabalho contribui para o entendimento integrado da transformação digital da vigilância militar e aponta para tendências emergentes, como enxames inteligentes, interoperabilidade homem-máquina e sistemas letais autônomos supervisionados.

Palavras-chave: Sistemas não tripulados. ISR. UAV. USV. UUV. Inteligência militar. Robótica.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE USE OF UNMANNED SYSTEMS IN INTELLIGENCE, SURVEILLANCE AND RECONNAISSANCE MISSIONS AND IN INTERACTION WITH TROOPS AND UNITS IN MILITARY OPERATIONS

This monograph investigates the use of unmanned aerial vehicles, surface vehicles, and underwater vehicles in Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance missions, examining their evolution, operational capabilities, and impact on modern military strategies. The study shows how these platforms enhance situational awareness and enable effective operations without risking human lives, making them essential assets for both major powers and resource-limited nations. It compares the specific features and challenges of each domain: unmanned aerial vehicles deliver tactical and strategic Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance missions, but face constraints in contested environments; unmanned surface vehicles emerge as economical platforms for maritime patrolling and deterrence; unmanned underwater vehicles operate stealthily in deep-sea environments, ideal for monitoring submarine cables and sensitive zones. Furthermore, the work discusses ethical, legal, and technological implications, such as Artificial Intelligence reliance, signal interference risks, and the growing militarization of the maritime and aerial domains. The conclusion highlights the centrality of unmanned systems in network-centric warfare and information dominance. However, successful integration requires coherent doctrine, international norms, and robust control mechanisms. This study contributes to an integrated understanding of the digital transformation in military surveillance and anticipates emerging trends such as intelligent swarms, human-machine teaming, and supervised lethal autonomous systems.

Keywords: Unmanned systems. ISR. UAV. USV. UUV. Military intelligence. Robotics.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASW	—	Guerra Antissubmarina
AUV	—	Veículos Subaquáticos Autônomos
FAA	—	Federal Aviation Administration
GA	—	Guerra Acústica
GE	—	Guerra Eletrônica
GPS	—	Sistema de Posicionamento Global
IMINT	—	Inteligência de Imagens
ISR	—	Intelligence, Surveillance and Reconnaissance
MB	—	Marinha do Brasil
MUM-T	—	Manned-Unmanned Teaming
ONU	—	Organização das Nações Unidas
OODA	—	Observar, Orientar, Decidir, Agir
P&D	—	Pesquisa e Desenvolvimento
REAC	—	Reconhecimento Acústico
RETRON	—	Reconhecimento Eletrônico
RIPEAM	—	Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar
ROV	—	Veículos remotamente Operados
RF	—	Radiofrequência
SAR	—	Radar de Abertura Sintética
SOSUS	—	Sound Surveillance System
UAVs	—	Unmanned Aerial Vehicles
USVs	—	Unmanned Surface Vehicles
UUVs	—	Unmanned Underwater Vehicles
XLUUVs	—	Extra-Large Unmanned Underwater Vehicles

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	DELIMITAÇÃO DO OBJETO.....	13
1.3	OBJETIVO.....	13
1.3.1	Objetivos específicos.....	13
2	VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS – BACKGROUND.....	14
2.1	VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (UNMANNED AERIAL VEHICLES).....	14
2.2	VEÍCULOS DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADOS (UNMANNED SURFACE VEHICLES).....	16
2.3	VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS (UNMANNED UNDERWATER VEHICLES).....	17
3	METODOLOGIA.....	19
4	EMPREGO DE SISTEMAS NÃO TRIPULADOS.....	21
4.1	EMPREGO DE SISTEMAS AÉREOS NÃO TRIPULADOS EM ISR.....	21
4.2	EMPREGO DE SISTEMAS DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADOS EM ISR.....	24
4.3	EMPREGO DE SISTEMAS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS EM ISR.....	27
5	ANÁLISE COMPARATIVA.....	31
5.1	DESAFIOS OPERACIONAIS E LIMITAÇÕES.....	32
5.2	POTENCIAL ESTRATÉGICO E IMPACTO NO PODER MILITAR.....	34
5.3	IMPLICAÇÕES TECNOLÓGICAS E TENDÊNCIAS FUTURAS.....	37
6	CONCLUSÃO.....	38
7	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A história da tecnologia de drones remonta à Primeira e Segunda Guerras Mundiais, e seu desenvolvimento evoluiu ao longo dos anos, adaptando-se às demandas dos conflitos e das guerras atuais (Ayamga; Akaba; Nyaaba, 2021). O emprego de veículos não tripulados aéreos (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs), de superfície (Unmanned Surface Vehicles – USVs) e subaquáticos (Unmanned Underwater Vehicles – UUVs) em missões de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (na língua inglesa, “Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (ISR))” tornou-se essencial para a construção de uma consciência situacional em tempo real, apoiando a tomada de decisão em operações de defesa, segurança pública e monitoramento do ambiente (Emimi; Khaleel; Alkrash, 2023; Kindervater, 2016;). Haja vista que o uso desses meios trazem vantagens como a eliminação do risco imediato a tripulações humanas, a capacidade de “ver sem ser visto” e de persistir por longos períodos observando alvos de interesse (Bousquet, 2018).

Destaca-se que tais atributos os tornam valiosos para missões de ISR, pois permite coletar informações e monitorar ameaças em cenários de alto perigo ou de difícil acesso, seja sobre o território, no mar ou abaixo da superfície. No ar, os UAVs equipados com sensores eletro-ópticos, infravermelhos e LiDAR viabilizam o imageamento de alta resolução (temporal, espacial, espectral, e radiométrica) e a cobertura de áreas extensas, por um longo período de tempo (Bousquet, 2018; Emimi; Khaleel; Alkrash, 2023). Na superfície, os USVs dotados de radares de abertura sintética (SAR) e sonares de varredura lateral contribuem para o monitoramento e vigilância marítima, utilizando enlaces de dados via satélite e/ou por radiofrequência (RF) para operação remota. E, abaixo d’água, os UUVs empregam sistemas acústicos, magnetômetros e câmeras subaquáticas para georreferenciar o fundo oceânico e identificar objetos imersos, ainda que sob condições adversas de pressão e visibilidade.

No contexto internacional contemporâneo, esses sistemas têm se difundido rapidamente e desempenhado papéis cruciais. No domínio aéreo, drones de todos os portes são empregados em zonas de conflito e em operações de contraterrorismo (notadamente após os eventos de 11 de setembro de 2001) provendo vigilância persistente e, em alguns casos, capacidade de ataque de precisão (Kindervater, 2016). No domínio marítimo de superfície, marinhas experimentam embarcações

não tripuladas para patrulha e reconhecimento costeiro, embora essa tecnologia ainda esteja em fase inicial de adoção (Siciliano; Khatib, 2016). Já no âmbito subaquático, veículos submarinos autônomos são desenvolvidos para reconhecimento de minas, mapeamento do fundo do mar e rastreamento de submarinos, ampliando as capacidades de inteligência naval de forma discreta e contínua. Em todos os casos, há um esforço para integrar esses diferentes sistemas num quadro de guerra centrada em informação onde a superioridade em ISR pode conferir vantagem estratégica significativa.

Apesar dos avanços específicos em cada domínio, a coordenação integrada entre esses três ambientes permanece um desafio, especialmente quanto à interoperabilidade de protocolos de comunicação, fusão de dados oriundos de diversos sensores e de arquiteturas distribuídas de comando e controle (Wu; Low; Lv, 2020). Portanto, compreender as potencialidades e limitações dos sistemas não tripulados é essencial para fundamentar políticas públicas, decisões estratégicas e inovações tecnológicas sustentáveis e responsáveis.

1.1 JUSTIFICATIVA

A complexidade crescente dos teatros de operações, tais como áreas urbanas, rurais, costeiras, de fronteira, de plataformas offshore e zonas de desastre natural, gera a demanda por sistemas ISR capazes de operar de forma colaborativa em múltiplos ambientes, mitigando espaços sem cobertura e minimizando as “zonas de sombra”. O emprego integrado e sinérgico de UAVs, USVs e UUVs potencializa a efetividade da detecção e rastreamento de alvos, além de permitir o compartilhamento dinâmico de informações entre as plataformas, o que reduz os tempos de resposta e otimiza os esforços (Wu; Low; Lv, 2020).

Nas Forças Armadas, o emprego de drones militares pode reduzir significativamente os custos e riscos associados às operações de aeronaves tripuladas. Os drones eliminam a necessidade de pilotos humanos, reduzindo a exposição do pessoal ao perigo e potencialmente salvando vidas (Ayamga; Akaba; Nyaaba, 2021; Bousquet, 2018). Portanto, os pilotos de drones não podem ser abatidos, capturados ou torturados. Por fim, o emprego de sistemas não tripulados permite a realização de vigilância e reconhecimento aprimorados, assim como a realização de ataques de precisão.

Diante do exposto, considerando a importância do emprego de sistemas não tripulados têm para diversos setores das Forças Armadas, esta pesquisa será desenvolvida a fim de analisar o emprego de sistemas não tripulados aéreos, de superfície e subaquáticos em missões ISR.

1.2 DELIMITAÇÃO DO OBJETO

Esta pesquisa se limitará na análise do potencial de uso da Inteligência de Imagens (IMINT) em missões de ISR, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. No entanto, o espaço temporal estará delimitado aos últimos 25 anos, por decisão pessoal do autor. O emprego de sistemas não tripulados aéreos, de superfície e subaquáticos nas ações de Guerra Eletrônica (GE) e de Guerra Acústica (GA) será avaliado, assim como a sua utilização em missões de ISR. A análise enfatizará a identificação dos desafios, oportunidades, lições e conhecimentos a serem aprendidos e adquiridos, que se apliquem na execução de missões de ISR, com o propósito de gerar conhecimento útil, a fim de contribuir para elevar a mentalidade de GE e de GA na Marinha do Brasil (MB), por meio da publicação desta monografia.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é analisar o emprego de sistemas não tripulados aéreos, de superfície e subaquáticos em ações de GE e de GA, por meio de Reconhecimento Eletrônico (RETRON) e Reconhecimento Acústico (REAC) com ênfase em IMINT em missões de ISR utilizando técnicas de sensoriamento remoto, com abordagem nas capacidades, desafios e perspectivas de aplicação no contexto internacional.

1.3.1 Objetivos específicos

Para atingir esse objetivo, foram elaborados os seguintes objetivos específicos:

- a) Descrever os aspectos positivos do emprego de sistemas não tripulados;
- b) Apresentar os desafios do emprego de sistemas não tripulados; e

c) Relatar as lições que podem ser aprendidas e os conhecimentos que podem ser adquiridos com o emprego de sistemas não tripulados.

Este estudo está organizado da seguinte forma: no capítulo 2, são discutidos os conceitos-chave, evolução histórica e debates acadêmicos sobre o impacto desses sistemas, com base em literatura científica relevante. O capítulo 3 descreve a metodologia da pesquisa realizada. No capítulo 4, as aplicações práticas de ISR para cada tipo de sistema são apresentadas, incluindo exemplos e capacidades atuais. No capítulo 5, a discussão aprofunda a interpretação desses resultados, abordando os desafios operacionais, potencial estratégico e implicações tecnológicas de cada categoria de sistema não tripulado no cenário internacional contemporâneo. Finalmente, no capítulo 6, a conclusão é apresentada em conjunto com as considerações finais e uma reflexão sobre tendências futuras.

2 VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS – BACKGROUND

2.1 VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (UNMANNED AERIAL VEHICLES)

A incorporação de veículos não tripulados em missões de ISR insere-se em tendências históricas da guerra e da tecnologia. Desde os primórdios da artilharia e da aerofotografia, a capacidade de observar o inimigo à distância sempre ofereceu vantagem militar. Bousquet (2018) argumenta que existe um “ideal programático” perene no pensamento militar: ver sem ser visto e aliar visão à capacidade letal a distância. Esse ideal manifesta-se hoje nos sistemas não tripulados modernos, especialmente os aéreos, que carregam sensores de alta resolução e, em alguns casos, armamentos de precisão, permitindo uma forma de “vigilância letal” (*lethal surveillance*) conforme conceituado por Kindervater (2016). A autora, ao examinar a história dos drones, identifica a convergência de duas tendências centrais na guerra ocidental do último século – a crescente importância de ISR e o desenvolvimento de ataques precisos a alvos móveis – convergência esta que culmina no drone contemporâneo, capaz de identificar e eliminar alvos em tempo real com mínima intervenção humana direta. Essa capacidade de vigilância persistente atrelada ao poder de ataque imediato transformou as práticas de combate e vigilância, suscitando debates éticos, jurídicos e estratégicos sobre a redução do limiar para uso da força e sobre a desumanização do ato de vigiar e matar remotamente.

No debate sobre a importância militar dos drones aéreos, há visões contrastantes. Alguns analistas veem os drones como uma revolução nos assuntos militares, comparável à introdução da pólvora, insinuando que poderiam substituir completamente aeronaves tripuladas em várias funções. Entretanto, estudos como o de Mahadevan (2010) sustentam que os drones representam antes uma evolução incremental do que uma ruptura total. Ele argumenta que o crescimento do uso de drones foi impulsionado por necessidades específicas das guerras pós-11 de Setembro (especialmente contrainsurgência e contraterrorismo) e que esses sistemas enfrentam limitações fundamentais (tanto tecnológicas quanto doutrinárias) que impedem sua supremacia absoluta sobre meios tripulados. Por exemplo, um drone é vulnerável em espaços aéreos contestados: contra um adversário equipado com defesas antiaéreas modernas, UAVs convencionais de grande porte teriam dificuldade de sobrevivência, pois os operadores remotos não têm a mesma capacidade de detecção e reação instantânea a ameaças que um piloto embarcado teria. Assim, drones armados têm se mostrado efetivos principalmente em cenários de superioridade aérea assegurada e contra alvos insurgentes ou terroristas com pouca ou nenhuma defesa antiaérea (Mahadevan, 2010). Nessas condições, os UAVs de altitudes média e alta, como o MQ-1 *Predator* e o MQ-9 *Reaper*, atuam como multiplicadores de força, fornecendo vigilância contínua e, quando armados, engajando alvos de oportunidade quase que imediatamente (Bousquet, 2018). Ainda assim, historicamente, seu papel tem sido majoritariamente de coleta de inteligência e orientação de ataques por plataformas tradicionais, mais do que substitutos integrais de aviões de combate (Mahadevan, 2010). Essa perspectiva evolutiva, não revolucionária, é fortalecida pelo histórico de emprego: drones de reconhecimento foram utilizados já no Vietnã (anos 1960-70) para fotografar alvos e sondar defesas inimigas, e Israel empregou UAVs com sucesso no conflito do Líbano em 1982 para enganar radares sírios, ilustrando que seu valor como suporte de ISR vem de décadas (Mahadevan, 2010). Contudo, cada avanço (por exemplo, autonomia crescente ou a miniaturização) amplia gradualmente os cenários de emprego integrando esses sistemas cada vez mais nas doutrinas militares.

Outro aspecto teórico relevante é a difusão internacional dessas tecnologias. Enquanto a proliferação de drones militares inicialmente suscitou temores de um nivelamento do campo de batalha – já que drones considerados relativamente baratos poderiam ser adquiridos ou produzidos por países menos desenvolvidos –

estudos aprofundados indicam que não é trivial reproduzir as capacidades avançadas de drones de alto desempenho. Gilli A. e Gilli M. (2016) analisam os fatores industriais, organizacionais e infraestruturais envolvidos e concluem que mesmo na era da globalização, há barreiras significativas à difusão irrestrita de drones de combate sofisticados. Projetar, integrar e operar sistemas complexos de UAV requer laboratórios, instalações de testes e um pessoal de *know-how* acumulado que não se adquire facilmente ou rapidamente. Além disso, a incorporação eficaz de drones exige adaptação organizacional e infraestrutura de apoio (por exemplo, redes de comunicação por satélite, estações de controle, equipes treinadas para análise de dados de ISR) que representam obstáculos adicionais. Conforme Gilli A. e Gilli M. (2016), até países militarmente avançados como o Reino Unido, França e Alemanha enfrentaram dificuldades para desenvolver ou implementar drones equivalentes aos dos Estados Unidos. Isso sugere que, embora pequenos drones comerciais estejam amplamente disponíveis no mundo todo, a classe militar de maior porte e tecnologia (como drones MALE – *Medium Altitude Long Endurance* – armados ou HALE – *High Altitude Long Endurance* – de vigilância estratégica) permanece concentrada em poucas nações, ou seja, a proliferação qualitativa é mais lenta do que a quantitativa. Em suma, possuir drones eficazes em cenários de alta exigência tecnológica é privilégio de um grupo restrito de países, o que contrasta com a noção inicial de que essa seria uma tecnologia facilmente “democratizada”.

2.2 VEÍCULOS DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADOS (UNMANNED SURFACE VEHICLES)

No que tange aos veículos de superfície não tripulados (USVs), o referencial teórico indica um estágio de desenvolvimento menos maduro em comparação aos aéreos. Essas plataformas, basicamente embarcações robóticas para uso na superfície de mares, rios ou lagos, historicamente, receberam menos atenção até recentemente. Siciliano & Khatib (2016) observam que sistemas de superfície para vigilância e segurança estão em sua infância tecnológica. Muitas iniciativas consistem em adaptar cascos de barcos existentes (por exemplo, lanchas semi-rígidas) com controle remoto ou autônomo, equipando-os com sensores apropriados. Para fins de ISR marítimo, radares compactos e câmeras eletro-

ópticas/infravermelhas são tipicamente considerados para detecção de alvos na superfície do mar. Entretanto, desafios como a navegação autônoma segura (evitar colisões seguindo normas marítimas), estabilidade em condições adversas de ondas e vento, e comunicação confiável (pode ser via rádio ou satélite, mas sujeita a limitações de linha de visada e largura de banda) ainda estão em processo de solução. Consequentemente, a literatura indica que, até meados da década de 2010, os USVs eram sobretudo objetos de pesquisa e protótipos em teste, com aplicações operacionais pontuais como patrulha de portos e proteção de instalações costeiras (Siciliano; Khatib, 2016). Um exemplo citado é o *Protector*, um USV desenvolvido em Israel, utilizado para patrulhamento costeiro e segurança de embarcações maiores, e foi um dos primeiros do gênero a ser empregado operacionalmente. Os desafios de projeto para USVs incluem alcançar velocidade e alcance adequados, combinados com baixo calado (para operar próximo à costa) e boa autonomia. Diferentemente dos drones aéreos, os veículos de superfície podem carregar mais peso sem restrição tão severa de energia, permitindo sensores maiores ou fontes de energia mais duradouras; porém, a exposição a condições marítimas imprevisíveis impõe a necessidade de estruturas robustas e controle adaptativo de pilotagem para cada estado do mar previsto na Escala Douglas. Assim, teoricamente, os USVs têm grande potencial para ampliar a vigilância marítima de forma persistente e econômica (podendo permanecer no mar mais tempo que embarcações tripuladas antes de retornar à base), mas representam um campo emergente cujo impacto estratégico pleno ainda está por se concretizar na literatura.

2.3 VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS (UNMANNED UNDERWATER VEHICLES)

Para os veículos subaquáticos não tripulados, frequentemente chamados de Unmanned Underwater Vehicles (UUVs), englobando tanto veículos remotamente operados (ROVs) quanto veículos subaquáticos autônomos (AUVs), o referencial teórico destaca que se trata de um setor em ascensão impulsionado por avanços tecnológicos e necessidades estratégicas. Yuh (2000) já apontava que, nos anos 1990, houve um aumento substancial nos esforços de pesquisa e desenvolvimento (P&D) em robótica submarina em todo o mundo, resultando na construção de cerca de 30 novos AUVs naquela década. Esse movimento foi motivado pela crescente

atenção ao ambiente oceânico tanto para questões ambientais quanto para tarefas científicas e militares. Os oceanos abrigam recursos e representam rotas estratégicas, além de ocultarem ameaças (como minas navais e submarinos inimigos); logo, a necessidade de sistemas subaquáticos capazes de explorar, monitorar e intervir tornou-se evidente (Yuh, 2000). A maioria dos robôs submarinos em uso comercial e militar até então eram os ROVs com cabo umbilical, que fornece energia e comunicação em tempo real, e com a necessidade de um operador na superfície (Yuh, 2000). Esses sistemas são valiosos, por exemplo, para inspeção de plataformas de petróleo ou desarmamento de minas, porém sofrem de limitações como o alto custo operacional, a restrição imposta pelo cabo (alcance limitado e risco de enroscar) e fadiga de operadores devido à necessidade de teleoperação intensiva (Yuh, 2000). Por isso, a pesquisa voltou-se a AUVs, que pudessem executar missões predefinidas sem conexão física, aumentando o alcance e reduzindo a intervenção humana direta. Yuh (2000) salienta que o ambiente subaquático é extremamente desafiador e não estruturado, tornando complexas tarefas básicas como navegação (sem GPS disponível debaixo d'água, a localização deve ser estimada por sensores inerciais, acústicos ou técnicas de *dead reckoning* – navegação estimada), comunicação (ondas de rádio não se propagam bem na água, exigindo uso de acústica de baixa taxa de dados) e controle de movimento (a hidrodinâmica e a flutuação impõem restrições severas) (Yuh, 2000). Embora grandes progressos tenham ocorrido em materiais, processamento computacional e sensores (por exemplo, sonares mais compactos e eficientes), a confiabilidade e autonomia plenas dos AUVs ainda constituíam, no início dos anos 2000, áreas abertas de pesquisa (situação que continuou evoluindo nas duas décadas seguintes). De acordo com Siciliano & Khatib (2016), os UUVs em operação variam desde pequenos veículos portáteis até grandes plataformas de mais de 10 metros de comprimento, cada tamanho trazendo soluções de compromisso entre autonomia energética, alcance e capacidade de carga de sensores. Sonar de varredura lateral e outros sensores acústicos são comumente o principal meio de coleta de dados de vigilância subaquática, usados tanto para detectar objetos (minas, destroços, submarinos) quanto para mapear o relevo e obter referências à navegação (Siciliano; Khatib, 2016). Uma observação crucial é que a maioria dos UUVs operacionais ainda é do tipo *tethered* (ligada por cabo), devido à segurança e à comunicação contínua que o cabo propicia, enquanto os AUVs totalmente

autônomos têm ganhado espaço sobretudo em projetos experimentais e missões especializadas (Siciliano; Khatib, 2016). A limitação na comunicação subaquática é destacada como um obstáculo: conectar o robô submerso com operadores ou redes de comando é difícil, pois sinais acústicos são lentos e facilmente degradados, e emergir para comunicar via rádio/satélite pode comprometer a furtividade da missão (Siciliano; Khatib, 2016). Assim, a autonomia inteligente (capacidade do veículo tomar decisões locais com base em sensores, por exemplo, mudar de rota para evitar colisão ou replanejar busca se um alvo for detectado) é um tema central na literatura de AUVs. Em síntese, teoricamente reconhece-se que os veículos subaquáticos não tripulados têm um enorme potencial estratégico (por exemplo, permitir vigilância de portos adversários, monitoramento de cabos submarinos e detecção antecipada de ameaças submersas sem arriscar submarinistas), mas isso depende de superar desafios tecnológicos para torná-los tão confiáveis quanto os meios tripulados tradicionais.

3 METODOLOGIA

Este trabalho caracterizou-se como uma pesquisa bibliográfica e documental, voltada a compilar e analisar criticamente estudos científicos sobre o emprego de sistemas não tripulados em ISR. Inicialmente, foram selecionadas obras de referência e artigos acadêmicos considerados centrais para o tema, incluindo livros e capítulos de livros de grande relevância teórica e histórica, bem como análises contemporâneas publicadas em periódicos de segurança e tecnologia. Dentre as fontes priorizadas, destacam-se: Bousquet (2018), que fornece uma perspectiva histórica e conceitual sobre a evolução da percepção e vigilância militares; Mahadevan (2010), com uma análise das capacidades e limitações militares dos drones; Gilli A. e Gilli M. (2016), que investigam os fatores que afetam a disseminação internacional da tecnologia de drones de combate; Kindervater (2016), cujo trabalho aprofunda a conexão entre vigilância e letalidade no contexto dos drones; Kumar e Michael (2012), tratando dos avanços e desafios em veículos aéreos não tripulados de pequeno porte; as compilações técnicas de Siciliano & Khatib (2016) e Valavanis e Vachtsevanos (2015), que fornecem fundamentos de robótica aplicada a veículos não tripulados aéreos; além de estudos específicos como Wu, Low e Lv (2020), representando pesquisas em planejamento de trajetórias

cooperativas, e Yuh (2000), que faz um panorama das inovações em robôs submarinos.

A execução da pesquisa envolveu a leitura detalhada e comparação dessas fontes, extraindo tanto informações descritivas (por exemplo, classificações de tipos de veículos, características técnicas, exemplos de emprego operacional) quanto analíticas (por exemplo, argumentos sobre implicações estratégicas, críticas sobre limitações e potencial futuro). Os dados e argumentos relevantes foram organizados de forma a permitir uma abordagem equilibrada entre os três domínios de sistemas (aéreo, superfície, subaquático). Procurou-se identificar, para cada categoria de veículo, quais são suas principais aplicações ISR documentadas, quais desafios técnicos e operacionais são mais mencionados na literatura, e quais benefícios estratégicos esses sistemas proporcionam ou prometem proporcionar.

Optou-se por uma abordagem qualitativa, dada a natureza do objeto de estudo, que envolve conceitos de estratégia militar, percepções tecnológicas e tendências de desenvolvimento, portanto não sendo adequada a quantificação simples. Entretanto, sempre que possível, incorporaram-se exemplos empíricos documentados (casos de uso real de drones em conflitos, testes de USVs por determinadas marinhas, números de veículos produzidos, etc.) para sustentar as afirmações. Esses exemplos auxiliam na apresentação da aplicação prática da discussão teórica.

Adicionalmente, foi adotada uma perspectiva comparativa internacional. Isso significa que a pesquisa não se restringiu a uma única nação ou força armada, mas sim buscou abarcar tendências globais: por exemplo, discute-se tanto o emprego de drones pelos Estados Unidos quanto o de outros países, e aborda-se a capacidade de adoção tecnológica em distintas realidades nacionais, como descrito por Gilli A. e Gilli M. (2016). Do mesmo modo, para USVs e UUVs, consideraram-se programas e estudos de diversos países, na medida em que a literatura acessível os contemplava. Essa amplitude assegura que as conclusões não fiquem limitadas a um caso específico, mas reflitam um panorama mais geral e dos desafios no emprego de sistemas não tripulados em ISR.

Em termos de estruturação, após reunir e sintetizar as informações, estas foram detalhadas nas seções de Resultados e Discussão. Os Resultados focam em apresentar de forma objetiva os dados e exemplos encontrados para cada tipo de sistema em ISR. Já a Discussão traz uma interpretação crítica desses resultados,

confrontando-os com as hipóteses teóricas e explorando seu significado no contexto estratégico dos últimos 25 anos.

Por fim, cabe ressaltar que este trabalho não envolve dados experimentais inéditos nem levantamento estatístico próprio; seu rigor advém da triangulação de múltiplas fontes qualificadas e da relação que se estabelece entre elas. Qualquer lacuna identificada na literatura – por exemplo, poucos estudos práticos sobre USVs em certos ambientes – é mencionada como parte da análise, constituindo também um indicativo de oportunidades para pesquisas futuras. Assim, a metodologia adotada busca conferir ao trabalho tanto abrangência (cobrindo diferentes aspectos do tema) quanto profundidade (examinando criticamente o que os autores especialistas propõem), na medida do possível.

4 EMPREGO DE SISTEMAS NÃO TRIPULADOS

4.1 EMPREGO DE SISTEMAS AÉREOS NÃO TRIPULADOS EM ISR

Os veículos aéreos não tripulados (UAVs) já alcançaram um patamar de ampla utilização em missões ISR ao redor do mundo. Esses sistemas se tornaram onipresentes em teatros de guerra modernos e em operações de segurança, variando desde pequenos quadricópteros de curto alcance até grandes aeronaves de alta altitude e longa permanência.

No âmbito estratégico, destacam-se drones como o RQ-4 *Global Hawk* dos EUA, capaz de voar a altíssimas altitudes por mais de 30 horas, fornecendo vigilância contínua sobre vastas áreas. Esses UAVs estratégicos cumprem missões de reconhecimento de longo alcance sobre territórios hostis, coletando imagens de SAR e eletro-ópticas com resolução suficiente para identificar movimentações militares e instalações críticas. Conforme definição de Mahadevan (2010), tais sistemas estratégicos operam a milhares de quilômetros da base de lançamento e cruzam a estratosfera por dezenas de horas, sendo empregados tipicamente para monitoramento de nações inteiras ou regiões de interesse estratégico. Um exemplo prático foi seu uso na Guerra do Afeganistão e no Iraque, onde esses drones mapearam fronteiras e terrenos antes inexplorados, identificando mais alvos e ameaças do que as forças em campo podiam engajar imediatamente (Mahadevan, 2010). Isso evidenciou uma das características dos drones ISR: eles produzem

enorme volume de informações (imagens de vídeo ao vivo, fotografias e sinais eletrônicos interceptados) que podem exceder a capacidade humana de análise em tempo real, tornando necessária uma infraestrutura robusta de processamento e inteligência para aproveitar plenamente os dados coletados.

No nível operacional/tático, os drones médios, como o MQ-1 *Predator* e MQ-9 *Reaper* (categoria MALE – “*Medium-Altitude Long-Endurance*”), assumiram papel central em operações contra insurgentes e terroristas. Esses veículos, operando tipicamente a altitudes entre 5 e 15 mil metros, podem servir simultaneamente como plataformas de sensor e de armas (Bousquet, 2018). Em missões ISR, eles fornecem vigilância de áreas específicas onde há suspeita de atividades hostis, monitorando padrões de vida diária, comboios, reuniões de líderes inimigos etc. Os EUA, por exemplo, empregaram intensivamente os “*Predators*” e “*Reapers*” no Afeganistão e no Paquistão para identificar combatentes insurgentes e acompanhá-los furtivamente até o momento de um ataque (seja por aeronaves convencionais em cooperação, seja pelos próprios drones armados com mísseis AGM-114 *Hellfire*). Relatos compilados por Mahadevan (2010) indicam que essa prática gerou efeitos como desorganizar a liderança insurgente e fomentar paranoia entre combatentes, que passaram a temer serem vigiados a todo instante. Além disso, as capacidades de ISR dos drones ajudaram a poupar vidas de soldados aliados ao detectar emboscadas e dispositivos explosivos improvisados antes que tropas terrestres fossem surpreendidas (Mahadevan, 2010). Vale ressaltar que, segundo Mahadevan (2010), fora os cenários de contrainsurgência, o papel desses drones no ataque direto é mais limitado, reafirmando que sua principal contribuição é como força multiplicadora de inteligência e apoio aéreo visual. Em ambientes permissivos, eles suplementam ou substituem missões de reconhecimento tradicional que seriam executadas por pilotos, como por exemplo, voando baixo para identificar objetivos, tarefa arriscada que um drone pode realizar sem colocar em perigo uma vida humana. Já em cenários com maior ameaça, como mencionado, as vulnerabilidades aparecem: drones como o *Predator* não possuem sistemas avançados de autoproteção e foram projetados sem furtividade, o que os torna alvos relativamente fáceis para defesas aéreas modernas, caso operem sem supremacia aérea garantida (Mahadevan, 2010).

Outra aplicação significativa de UAVs em ISR é vista em contextos civis e de segurança interna. Forças policiais e agências de fronteira em diversos países

adotaram drones de pequeno porte (mini ou micro UAVs) para vigilância de fronteiras, monitoramento de protestos e apoio em situações de emergência. Mahadevan (2010) cita que drones táticos de curto alcance já são usados por forças policiais em nações desenvolvidas para controle de multidões e vigilância de áreas urbanas sensíveis. Esses modelos são frequentemente controlados diretamente por uma equipe no terreno e fornecem, por exemplo, imagens aéreas em tempo real de um cenário de reféns ou de um acidente industrial, melhorando a consciência situacional dos agentes envolvidos. Em operações de fronteira, pequenos drones equipados com câmeras térmicas conseguem detectar movimentações noturnas de pessoas ou veículos em áreas remotas, auxiliando na interceptação de contrabando e imigração ilegal. Assim, verifica-se que as capacidades ISR dos drones extrapolam o campo estritamente militar, expandindo-se para a segurança pública e gestão de crises humanitárias (como reconhecimento de áreas atingidas por desastres naturais, onde drones mapeiam destruição e buscam sobreviventes).

Apesar dos casos de sucesso, os resultados também evidenciam limites operacionais dos UAVs. Uma das restrições mais comentadas é sua susceptibilidade a condições meteorológicas adversas e obstáculos de terreno. Diferentemente de aeronaves tripuladas robustas, muitos drones (especialmente os menores) não podem voar com segurança em ventos fortes, chuvas pesadas ou em ambientes com gelo, sob pena de perderem estabilidade ou danificarem sensores. Além disso, o controle remoto via enlace de comunicação pode ser interrompido por interferência eletromagnética deliberada (guerra eletrônica inimiga) ou por obstruções geográficas (vales profundos, montanhas) que bloqueiem sinais de rádio. Há episódios documentados em que drones tiveram pane ou foram “sequestrados” ciberneticamente pelo inimigo, por exemplo, o caso de um RQ-170 *Sentinel* americano que caiu (alegadamente trazido a solo pelos iranianos em 2011 através de ataque eletrônico). Tais ocorrências ressaltam que, embora não haja um piloto a ser capturado, a perda de um drone avançado implica risco de comprometimento tecnológico, pois o adversário pode recuperar e estudar seus sistemas. Outra limitação é a questão logística e de pessoal: contrariando a intuição de que drones requerem menos recursos humanos, na prática cada missão de drone envolve uma equipe numerosa de operadores e analistas. Siciliano e Khatib (2016) aponta que um único *Predator* em voo pode demandar uma dúzia de pessoas em turnos (piloto remoto, operador de sensores, equipes de manutenção, analistas de inteligência

etc.). Adicionalmente, problemas de fadiga e erro humano não desaparecem, conforme os relatórios da Força Aérea dos EUA, citados por Siciliano e Khatib (2016), onde reconhecem que grande parte dos acidentes com drones decorreu de falha humana na operação. Portanto, operar UAVs de forma extensiva requer quase tanta estrutura quanto aeronaves tripuladas, apenas distribuída de modo diferente (com mais pessoal em terra do que no ar).

4.2 EMPREGO DE SISTEMAS DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADOS EM ISR

No domínio marítimo de superfície, o emprego de veículos não tripulados de superfície (USVs) em ISR está emergindo gradualmente, com algumas aplicações iniciais e experimentais registradas internacionalmente. Esses veículos incluem desde pequenas lanchas rápidas controladas remotamente até embarcações do tamanho de navios patrulha com algum grau de autonomia. Em comparação aos drones aéreos, os USVs ainda não atingiram o mesmo nível de difusão ou importância operacional, mas os resultados mostram que eles possuem um potencial significativo para ampliar a vigilância e patrulha marítima com menor custo e risco (Siciliano; Khatib, 2016; Valavanis; Vachtsevanos, 2015; Yuh, 2000).

Uma aplicação primordial dos USVs em ISR é a vigilância de áreas portuárias e costeiras. Alguns países, como Israel e Estados Unidos, desenvolveram USVs equipados com câmeras diurnas/noturnas, radares de pequeno alcance e até sensores sonar para detectar ameaças à superfície ou semissubmersas (minas flutuantes, mergulhadores de combate, etc.). O *Protector* da empresa israelense Rafael, por exemplo, é um USV armável que foi testado em missões de patrulhamento de portos e instalações offshore. Seu uso demonstra a viabilidade de manter perímetro de vigilância autônomo 24 h em torno de ativos navais de alto valor (como navios fundeados ou terminais portuários), podendo alertar sobre intrusões ou atividades suspeitas sem expor pessoal ao perigo (Heo; Kim; Kwon, 2017; Savitz, 2024). Da mesma forma, a Marinha dos EUA tem testado USVs como parte do programa chamado “*Ghost Fleet*”, no qual as embarcações não tripuladas colaboram com navios tripulados para estender o alcance de sensores. Tais USVs podem atuar como piquetes avançados, navegando à frente de um grupo-tarefa naval e fornecendo dados de radar e visual de contatos de superfície antes que os navios principais estejam próximos (Naval-Technology, 2023; O’Rourke, 2025; United

States Navy, 2021). Portanto, funcionando como extensões remotas dos sistemas de ISR do grupo. Essa capacidade é valiosa para detecção antecipada de embarcações hostis ou não identificadas, contribuindo para a consciência situacional marítima.

Outra frente de uso em desenvolvimento é no combate a ameaças assimétricas no mar, como pirataria e tráfico. Em áreas de alto risco de pirataria (por exemplo, no Golfo de Áden), USVs podem complementar patrulhas, inspecionando embarcações suspeitas sem colocar guardas humanos em perigo imediato. No combate ao narcotráfico no mar, há registro de testes de lanchas não tripuladas para perseguição e interceptação de lanchas rápidas de contrabandistas, usando câmeras e megafones para primeiro identificar e advertir, deixando a intervenção armada (se necessária) para equipes tripuladas que podem acompanhar. Nesse contexto, a coordenação entre UAVs e USVs mostra-se promissora: um drone aéreo pode localizar embarcações suspeitas e orientar um USV próximo para interceptação e identificação, combinando as vantagens da visão aérea ampla com a capacidade do USV de interagir diretamente no nível da água (Bae; Hong, 2023; Wu et al., 2023; Wu; Low; Lv, 2020; Yuh, 2000).

Apesar dessas aplicações, os desafios operacionais para USVs também emergem claramente nos resultados. Em primeiro lugar, a autonomia de navegação em ambiente marítimo complexo é um problema difícil. Diferentemente do ar, onde a colisão é rara, no mar um USV precisa ser capaz de detectar e evitar outros navios, redes de pesca, recifes e inúmeros obstáculos, obedecendo ao Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar (RIPEAM). Desenvolver algoritmos confiáveis que permitam a um USV navegar seguramente por águas congestionadas sem auxílio humano é objeto de intensa pesquisa, que ainda não está solucionado por completo para todos os cenários (Gu et al., 2022; Polvara et al., 2018; Yuan et al., 2023).

Em segundo lugar, o ambiente marítimo impõe condições severas: ondas e marés podem afetar a estabilidade de sensores (por exemplo, câmeras em USVs pequenos podem ter imagem tremida), e a água salgada é corrosiva para componentes eletrônicos. Logo, a manutenção e durabilidade desses veículos são considerações importantes (Cortes-Vega; Alazki; Rullan-Lara, 2023; Lv et al., 2025).

Outro ponto é a comunicação e controle. Enquanto um drone aéreo geralmente se comunica via rádio em linha de visada direta ou por satélite, um USV pode se afastar dezenas ou centenas de milhas náuticas de sua base ou navio-mãe.

Manter um link de controle confiável em longas distâncias marítimas pode requerer retransmissão por satélite, o que é caro e pode introduzir latência. Alternativamente, operar em modo mais autônomo exige confiança na inteligência de bordo do USV (Lv et al., 2025). Um ponto interessante é que a colaboração entre USV e outros veículos pode contornar certas limitações: Wu, Low e Lv (2020) propuseram que o USV sirva como nó de comunicação entre um UAV aéreo e um AUV submerso. No experimento idealizado pelos autores, o USV, estando na interface oceano-atmosfera, consegue receber dados via rádio do UAV e retransmitir via acústico para o AUV, e vice-versa, formando uma rede trinodal. Isso ilustra que os USVs podem ter um papel de ponte de dados em operações conjuntas, um uso de ISR menos convencional, porém crucial em cenários onde se busca integrar consciência situacional aérea e subaquática.

Quanto a parte de sensoriamento remoto, Bae e Hong (2023) apontam que os sensores mais comuns em USVs de ISR são: câmeras (dia/noite) para identificação visual; radar de navegação (para detectar outras embarcações e obstáculos mesmo à noite ou em neblina); e ocasionalmente sensores especializados como sonares de profundidade rasa (para detectar minas ou mergulhadores). Um USV pode carregar também estações meteorológicas para coletar inteligência ambiental. Entretanto, ao contrário dos drones aéreos que usufruem de uma perspectiva privilegiada do alto, os USVs têm horizonte limitado pela curvatura da Terra (semelhante a qualquer embarcação) e pelos obstáculos lineares (ondas, por exemplo, podem ocultar alvos baixos no horizonte). Assim, seu raio de observação direta é menor, o que reforça a ideia de operarem em conjunto com UAVs, que podem aumentar o alcance da detecção de alvos, conforme estudado por Wu, Low e Lv (2020). Ainda assim, em áreas litorâneas urbanas (como um porto), um USV equiparável a uma lancha pode circular entre píeres e navios, inspecionando o que um drone aéreo talvez não consiga ver sob coberturas ou dentro de estruturas (Bae; Hong, 2023). Portanto, cada plataforma entrega vantagens complementares.

Um exemplo concreto de emprego operacional de USVs foi que em 2021, a Marinha Real Britânica incorporou o *Maritime Demonstrator for Operational eXperimentation* (Madfox), um veículo de superfície não tripulado (USV) desenvolvido como parte do programa NavyX (programa responsável pelos testes e validação de tecnologias navais autônomas). O Madfox passou a ser empregado em testes e missões com o objetivo de explorar o potencial dos USVs em tarefas de

vigilância, patrulha e proteção de ativos marítimos. A embarcação foi projetada para operar de forma autônoma ou remota, integrando sensores e sistemas avançados capazes de executar missões de patrulha, escolta e coleta de inteligência em ambientes costeiros ou de mar aberto em apoio a forças navais convencionais (Naval-Technology, 2021; Royal Navy, 2021). A introdução desse sistema reforça a tendência crescente de utilização de veículos autônomos em tarefas de ISR, com menores riscos humanos e maior tempo de operação.

4.3 EMPREGO DE SISTEMAS SUBAQUÁTICOS NÃO TRIPULADOS EM ISR

No cenário subaquático, os veículos não tripulados submersíveis (notadamente os AUVs e, em parte, os ROVs) vêm assumindo um papel crescente em operações de ISR. Essas plataformas têm sido cada vez mais utilizadas para realizar missões anteriormente atribuídas a submarinos tripulados ou mergulhadores, principalmente em contextos que envolvem riscos elevados ou exigem discrição. De acordo com estudo do National Research Council (2005), os AUVs e ROVs já demonstram potencial operacional em tarefas como coleta de dados acústicos, mapeamento de áreas costeiras e inspeção de infraestruturas submarinas, o que evidencia sua contribuição crescente no domínio da guerra naval baseada em ISR.

Uma aplicação clássica de ISR subaquático é a guerra de minas, atividade historicamente associada a altos riscos para mergulhadores e embarcações tripuladas. Desde os anos 1990, as marinhas ocidentais passaram a utilizar ROVs para localizar e neutralizar as minas navais, reduzindo a exposição direta de pessoal. Com o avanço da tecnologia, AUVs como o REMUS e o Bluefin-21, têm sido empregados em varreduras independentes de áreas suspeitas, utilizando sonares para mapear o fundo marinho e identificar objetos potencialmente perigosos. Segundo Button et al., (2009), esses sistemas foram projetados especificamente para apoiar missões de contramedidas de minas, oferecendo maior alcance e segurança operacional. Bae e Hong (2023) também corroboram que AUVs demonstraram eficiência superior em precisão e tempo de resposta, consolidando-se como plataformas robustas em reconhecimento subaquático.

Outra função chave dos AUVs no contexto de missões ISR é o mapeamento hidrográfico e a vigilância de rotas marítimas. Esses veículos, quando equipados com sonares de varredura lateral e sensores magnéticos, são capazes de realizar levantamentos detalhados de portos, canais e fundos oceânicos próximos a instalações sensíveis, como bases navais (Bae; Hong, 2023). As informações obtidas alimentam bancos de dados de inteligência naval e permitem detectar alterações futuras no ambiente submarino. Por exemplo, se um ator hostil posicionar clandestinamente minas ou dispositivos de escuta, os dados coletados anteriormente permitem comparar com esse novo cenário, identificando anomalias.

Além disso, AUVs de longa duração, como o modelo *Sea Glider*, são capazes de patrulhar passivamente zonas estratégicas por longos períodos, coletando assinaturas acústicas de embarcações e submarinos que transitam na área. Essas assinaturas podem ser utilizadas para identificação de classes de navios pelo padrão de ruído, o que contribui para a construção de uma consciência situacional subaquática (Button et al., 2009). Embora os detalhes sobre operações com AUVs por grandes potências permaneçam em sua maioria classificados, estudos indicam que países como China e Rússia têm desenvolvido plataformas autônomas subaquáticas para monitorar atividades navais de adversários (Gilli A.; Gilli M., 2016), demonstrando o interesse global em explorar essa dimensão menos visível do ambiente marítimo no contexto de ISR.

Um avanço recente no campo dos sistemas subaquáticos não tripulados (UUVs) é a chegada dos *Extra-Large Unmanned Underwater Vehicles (XLUUVs)*, concebidos para operações de longo alcance e com maior autonomia. Um exemplo emblemático é o Orca XLUUV, desenvolvido pela Boeing para a Marinha dos Estados Unidos, com alcance estimado de até 6500 milhas náuticas e autonomia operacional de semanas. O primeiro exemplar foi entregue em dezembro de 2023, como parte de um esforço estratégico para ampliar as capacidades de vigilância subaquática contínua e operações de ISR de longo prazo. Com isso, veículos como o Orca são projetados para patrulhar áreas de interesse de forma furtiva, podendo instalar sensores, monitorar cabos submarinos ou mesmo coletar dados sobre atividades inimigas, sem o risco político associado à perda de uma plataforma tripulada (Naval-Technology, 2024).

Os resultados também destacam as capacidades de autonomia e inteligência artificial embarcadas nos AUVs mais modernos. Para cumprir ISR de forma eficaz,

um AUV precisa não apenas seguir um caminho pré-programado, mas reagir a dados detectados: por exemplo, se um sonar capta algo que parece ser um submarino, o AUV deve decidir segui-lo ou, pelo menos, registrar dados adicionais (como gravar áudio) antes de prosseguir. Já existem algoritmos de reconhecimento de padrões sonar que rodam em tempo real em certos AUVs, permitindo-lhes discriminar objetos de interesse (minas, destroços) em meio ao ruído do fundo do mar. Além disso, técnicas de fusão de sensores ajudam o AUV a melhorar sua própria navegação. Por exemplo, combinando leitura inercial com visadas ocasionais a GPS quando em superfície, ou utilizando mapas sonar para se localizar, o que é essencial para retornar à base ou ao ponto de recolha após a missão. Conforme Yuh (2000), a arquitetura de um robô submarino autônomo envolve múltiplos subsistemas (planejamento de missão, controle de movimento, percepção ambiental, gerenciamento de energia, etc.) que precisam operar de forma integrada e redundante para lidar com o ambiente hostil do oceano.

Os avanços em materiais (cascos resistentes), baterias de alta densidade energética e computação embarcada têm se traduzido em AUVs mais robustos e capazes na década de 2010-2020, permitindo missões ISR mais ambiciosas do que antes. Um exemplo marcante da aplicação prática dessa tecnologia foi o emprego de um Bluefin-21 autônomo para ajudar a procurar o voo MH370 desaparecido em 2014, no Oceano Índico. O Bluefin-21 autônomo foi utilizado para mapear de forma autônoma vastas áreas submersas em profundidades superiores a 4 mil metros. Embora essa missão tenha ocorrido em um contexto civil, demonstrou que um AUV podia mapear de forma autônoma grandes extensões a profundidades significativas, algo aplicável também a missões de ISR, como reconhecimento de áreas estratégicas, a busca de objetos militares, como submarinos afundados ou cargas submersas suspeitas (Valavanis; Vachtsevanos, 2015).

Em contrapartida, os desafios e limitações do ISR subaquático com veículos não tripulados também ficam evidentes. A comunicação em tempo real com um AUV submerso é extremamente limitada, forçando um paradigma de operação distinto do que ocorre com drones aéreos. Em vez de controle remoto direto, muitas vezes o AUV opera com base em instruções previamente programadas, atuando de forma autônoma por horas ou dias, para só então transferir os dados coletados ao emergir ou retornar à base. Isso implica que, diante de mudanças táticas inesperadas (por

exemplo, mudança na prioridade de inteligência ou surgimento de novo alvo), o redirecionamento imediato da missão é dificultado

Como solução parcial para esse desafio, Wu, Low e Lv (2020) propuseram um arranjo cooperativo entre veículos heterogêneos, no qual o USV atua como elo de comunicação entre um AUV submerso e um UAV no ar. Nessa proposta, o USV opera na interface oceano-atmosfera, retransmitindo sinais acústicos vindos do AUV para o UAV via rádio e vice-versa, formando uma rede trinodal. Essa abordagem busca mitigar os limites físicos da comunicação subaquática (que notadamente são a baixa largura de banda e o alcance restrito), ao incorporar um agente intermediário com acesso simultâneo aos dois domínios.

Mesmo com essas soluções, o fluxo de dados permanece restrito a pacotes curtos ou coordenadas simplificadas. Por isso, a utilização de AUVs permanece mais adequada às missões de reconhecimento estratégico ou vigilância prévia ao conflito, nas quais o tempo de resposta não é crítico, do que às ações táticas dinâmicas que exijam rastreamento em tempo real de alvos móveis submersos. Sendo esta tarefa ainda majoritariamente atribuída a submarinos tripulados ou helicópteros de Guerra Antissubmarina (ASW).

Outro desafio importante identificado para a operação de UUVs, especialmente os AUVs, refere-se à recuperação e confiabilidade do sistema. Em caso de falha crítica durante a missão, um AUV pode afundar a profundidades elevadas, dificultando ou mesmo inviabilizando sua recuperação (ao contrário de drones aéreos, que frequentemente caem em locais acessíveis ou flutuam, permitindo tentativas de resgate). Isso implica não apenas riscos financeiros, pela possível perda de equipamentos de alto valor, como também vulnerabilidades de segurança, caso os dados ou sistemas embarcados sejam recuperados por terceiros (Siciliano; Khatib, 2016; Yuh, 2000).

Para mitigar esses riscos, diversas soluções tecnológicas têm sido desenvolvidas. Sistemas de autodiagnóstico embarcado permitem que o AUV detecte falhas e aborte automaticamente a missão, retornando à superfície antes da pane completa (Wu; Low; Lv, 2020). Além disso, mecanismos como boias de emergência com dados críticos podem ser ejetados caso o veículo não retorne em tempo previsto, aumentando a segurança da missão. Tais medidas, embora ainda não padronizadas em todos os modelos, visam melhorar a confiabilidade operacional, especialmente em contextos onde os AUVs são empregados em

missões ISR com alto grau de autonomia e por períodos prolongados (Valavanis; Vachtsevanos, 2015).

Segundo estudos recentes, a maior parte dos UUVs atualmente em operação ainda é do tipo *tethered*, isto é, conectada por um cabo umbilical ao navio-base, enquanto os veículos verdadeiramente autônomos, os AUVs, têm aparecido predominantemente em cenários de pesquisa e testes experimentais (Siciliano; Khatib, 2016). Em outras palavras, ROVs *tethered* controlados remotamente continuam dominando as aplicações práticas (por exemplo, inspeções submarinas imediatas), ao passo que os AUVs (*untethered*), apesar dos avanços tecnológicos, ainda são pouco empregados operacionalmente (Molland, 2008). Essa preferência operacional por sistemas com cabo deve-se em parte à confiança e ao controle em tempo real que são proporcionados pelos ROVs.

Entretanto, observa-se uma tendência de transição para veículos totalmente autônomos, na medida em que estes vêm comprovando sua segurança e eficácia em campo. De fato, já há casos concretos de emprego militar de AUVs sem qualquer cabeamento físico. A Marinha Real da Noruega, por exemplo, utilizou AUVs do tipo *HUGIN* em operações de patrulha e contramedidas de minas no Mar Báltico, integrados a navios caça-minas, demonstrando sucesso na detecção e identificação de artefatos submarinos (Hagen et al., 2005). Por sua vez, a Marinha dos EUA empregou o AUV *REMUS*, em sua variante *Swordfish*, para vasculhar e vigiar o porto de *Umm Qasr*, no Iraque, durante a Operação *Iraqi Freedom* em 2003, na primeira missão de combate bem-sucedida envolvendo um veículo submarino autônomo (NOAA, 2018). Esses exemplos pioneiros deixam claro que o movimento de transição de sistemas *tethered* para plataformas subaquáticas realmente autônomas já está ocorrendo nas operações navais modernas, conforme veículos autônomos vão provando seu valor prático e confiabilidade em missões reais. Por fim, destaca-se o seu potencial estratégico em aumentar substancialmente a compilação tática e o reconhecimento do ambiente subaquático (tradicionalmente um domínio obscuro e perigoso) para as nações que dominarem essa tecnologia, ao mesmo tempo negando o uso livre desse meio aos adversários.

5 ANÁLISE COMPARATIVA

A partir dos resultados apresentados, torna-se evidente que os sistemas não tripulados (sejam aéreos, de superfície ou subaquáticos) configuram uma revolução gradual no campo de ISR, trazendo benefícios tangíveis ao mesmo tempo em que lançam novos desafios. Nesta discussão, serão examinados comparativamente os três domínios, enfatizando desafios operacionais, potenciais estratégicos e implicações tecnológicas no contexto internacional atual, bem como a inter-relação entre eles.

5.1 DESAFIOS OPERACIONAIS E LIMITAÇÕES

Comparando os desafios, nota-se que cada tipo de sistema não tripulado enfrenta obstáculos específicos ao meio em que opera, porém há também dificuldades transversais. Um ponto comum é a questão da integração segura no espaço de operações junto a meios tripulados. Para UAVs, isso se manifesta na integração ao espaço aéreo civil e militar, por exemplo, evitar colisões com aeronaves comerciais e cumprir normas de tráfego aéreo. As Leis e regulações estão gradualmente se adaptando: nos EUA, por exemplo, exigiu-se da *Federal Aviation Administration (FAA)* a criação de procedimentos para inserir UAVs no espaço aéreo até 2015 (FAA, 2013; Siciliano; Khatib, 2016). Ainda assim, incidentes e quase colisões entre drones e aviões civis ocorreram, demonstrando que a coordenação ainda não é perfeita. Já no mar, como discutido, um USV precisa integrar-se com segurança entre navios e embarcações civis; e de forma análoga, um AUV operando perto de rotas de navegação deve evitar causar acidentes submersos (por exemplo, emergir-se abruptamente sob um navio).

Outro desafio transversal é o da comunicação e controle sob pressão. Em todos os domínios, cenários de interferência intencional ou mau funcionamento do link de controle podem levar à perda do veículo ou, de forma mais grave, a ações imprevistas. Como, por exemplo, no caso de veículos armados, onde há grandes preocupações sobre perda de controle (Siciliano; Khatib, 2016; Valavanis; Vachtsevanos, 2015). Por isso, redundâncias e modos de segurança são imprescindíveis: drones aéreos costumam ter *lost link procedures*, isto é, comportamentos predefinidos caso percam comunicação os quais são tipicamente orbitar de forma programada e depois retornar automaticamente à base (FAA, 2016). Da mesma forma, USVs e AUVs precisam de protocolos similares. Por exemplo, um

USV pode entrar em modo de espera ou retornar ao ponto de lançamento se perder o sinal de controle. Ainda que esses protocolos existam, um adversário sofisticado pode tentar enganar o veículo, como no caso do *spoofing* de GPS, que é uma técnica que altera ou falsifica os sinais de navegação (Khan et al., 2021). Esse tipo de ataque com adulteração de sinais GPS tem sido demonstrado, o que implica que UAVs, USVs e UUVs devem calibrar com múltiplas referências, como leitura inercial e sinais de navegação, alternativos ao GPS, para serem resilientes (Khan et al., 2021; Valavanis; Vachtsevanos, 2015), especialmente em contextos de ISR. Esse é um campo tecnológico em evolução, integrando conceitos de guerra eletrônica na operação de veículos não tripulados (Siciliano; Khatib, 2016).

No campo específico de UAVs, um desafio discutido nos resultados é a vulnerabilidade a defesas aéreas e fatores meteorológicos. Estratégias para mitigar isso incluem: desenvolvimento de drones furtivos (com seção reta radar reduzida), uso de jamming contra radares inimigos durante incursões de drones, e o emprego de drones descartáveis (atribuindo missões de alto risco a drones baratos e sacrificáveis). Uma tendência recente é a noção de *swarms* (enxames) de pequenos drones cooperando cuja lógica é a saturação de defesas inimigas por meio de quantidade e inteligência coletiva. Essa tática poderia confundir defesas antiaéreas e garantir que, se alguns veículos forem abatidos, outros completassem a missão ISR. Bousquet (2018) menciona protótipos de drones miniaturizados inspirados em insetos atuando em conjunto, o que sugere que o futuro do ISR aéreo pode envolver enxames de micro-drones explorando zonas urbanas complexas ou saturando a vigilância de um inimigo (tornando impossível abater ou rastrear todos). Contudo, a coordenação de enxames eficazes requer avanços em inteligência distribuída e comunicação veicular, ainda em pesquisa.

Para USVs, além da navegação autônoma já tratada, há um desafio de robustez e autonomia energética. Diferente de drones aéreos cujas missões raramente excedem 40 horas nos melhores casos, um USV pode ser projetado para patrulhar semanas. Para isso, alguns recorrem à energia solar (painéis solares no convés) e à vela ou *kite* (empregando vento para poupar combustível), combinados com baterias. Tais inovações permitem autonomia enorme sem reabastecimento, ideal para ISR de longa duração no oceano. Por exemplo, o *Saildrone*, um USV movido à vela com painéis solares, já cruzou oceanos coletando dados meteorológicos e de pesca. Embora civil, sua tecnologia interessa militarmente, pois

poderia vigiar regiões remotas do oceano silenciosamente. O desafio está em manter esses sistemas confiáveis sob condições severas (tempestades, mares revoltos), sendo que no caso do Saildrone, já houve perda de unidade em furacão. Portanto, USVs de ISR terão de equilibrar robustez com eficiência energética.

No ambiente submarino, para os UUVs, o principal desafio segue sendo comunicação e autonomia decisória. A discussão teórica indica que, para certos usos, talvez a solução não seja 100% autonomia, mas híbridos humano-robô. Como, por exemplo, AUVs que sobem periodicamente à superfície para transmitir dados a um operador humano, recebendo novas instruções conforme necessário, antes de submergir novamente (Siciliano; Khatib, 2016). Essa espécie de “supervisão humana intermitente” pode ser um meio-termo razoável até que a IA seja avançada e confiável o suficiente para decisões críticas submarinas. Além disso, surgem questões de legalidade e regras de engajamento: um UAV armado pode identificar um combatente e atirar quase em tempo real; mas se um drone submarino detectasse um submarino inimigo, permitir-se-ia que ele atacasse autonomamente? Provavelmente hoje não, pois o engajamento de alto valor estratégico (como submarinos nucleares) permaneceria sob controle humano. Logo, há uma limitação doutrinária no emprego de UUVs: ainda que possam coletar inteligência, o salto para atuação letal autônoma debaixo d'água enfrenta barreiras éticas e de comando e controle.

5.2 POTENCIAL ESTRATÉGICO E IMPACTO NO PODER MILITAR

Do ponto de vista estratégico, a incorporação desses sistemas não tripulados em ISR está redefinindo conceitos de superioridade de informação e projeção de poder. Tradicionalmente, possuir melhor ISR significava dedicar grandes recursos a satélites, aviões espiões e patrulhas navais. Tais capacidades eram restritas a potências militares. Com drones, USVs e AUVs, há uma certa “democratização” do ISR básico. Por exemplo, países menores podem adquirir drones comerciais ou militarizados para monitorar suas fronteiras, insurgências ou zonas marítimas, a um custo muito menor do que manter esquadrões de aeronaves tripuladas de reconhecimento. Isso aumenta o número de atores com algum grau de capacidade ISR autônoma. No entanto, conforme apontado por Gilli A. e Gilli M. (2016), essa democratização tem limites, pois os drones mais capazes e integrados em rede

ainda requerem base industrial e organizacional avançada. Assim, as grandes potências mantêm vantagem, porém precisam considerar que adversários menores podem agora contar com “mini-olhos” nos céus e mares. Um reflexo disso foi visto em conflitos recentes onde rebeldes ou milícias empregaram pequenos drones para vigiar tropas governamentais ou guiar ataques, o que seria uma capacidade insurgente inédita há algumas décadas atrás.

No contexto de grandes potências, sistemas não tripulados elevam o patamar de vigilância contínua global. Os EUA, por exemplo, ao manter drones de longa duração em várias regiões (Oriente Médio, Ásia, África) basicamente criaram uma rede de presença ISR persistente, algo que antes só satélites de reconhecimento proporcionavam em parte. A diferença é que drones podem ser reprogramados dinamicamente, mudar de área, focar em alvos emergentes, o que torna a informação mais oportuna. Essa ubiquidade de “olhos no céu” leva alguns autores, como Bousquet (2018), a falar em um “imperium global de alvos”, onde qualquer ponto do globo pode ser potencialmente observado e, se hostil, atingido rapidamente. Em outras palavras, do ponto de vista estratégico, drones armados integrados a ISR criam uma capacidade de engajamento seletivo global. Isso tem implicações profundas: dilui fronteiras entre guerra e paz (um país pode sofrer um ataque de drone sem declaração formal de guerra, como ocorreu no Iêmen e Paquistão na última década), e desafia as convenções de soberania (voos de drones em espaço aéreo de países não beligerantes ocorreram sob alegação de atingir terroristas). Estratégias militares nacionais passaram a incluir a neutralização de redes de drones inimigas como objetivo prioritário em caso de conflito convencional, pois sabe-se que quem controlar e tiver superioridade nas ações de ISR não tripulado terá enorme vantagem na condução das operações.

Para USVs e UUVs, o potencial estratégico está em grande parte relacionado ao domínio marítimo. O século XXI vê uma competição intensificada em mares e oceanos (disputas territoriais, proteção de rotas comerciais, acesso a recursos submarinos). Nesse contexto, amplas frotas de sensores não tripulados podem mudar a dinâmica de poder naval. Por exemplo, em vez de grandes frotas de *destroyers* e fragatas para patrulha, enxames de USVs baratos poderiam monitorar extensões oceânicas, reportando contatos suspeitos a poucos navios tripulados, que então interviriam. Isso seria uma forma de “diluição” do poder naval, tornando difícil a um adversário saber onde estão os olhos e ouvidos do outro. Pois, hoje concentra-

se em grandes navios, amanhã pode estar espalhado em dezenas de pequenos robôs, alguns possivelmente debaixo d'água. A China, os EUA e a Rússia investem em projetos de drones submarinos inclusive como parte da tríade estratégica, visando construir, em um futuro próximo, um cenário em que drones monitorarão continuamente as áreas de patrulha de submarinos nucleares inimigos, ameaçando a furtividade destes e, portanto, alterando o equilíbrio de dissuasão. É sabido que um elemento-chave da dissuasão nuclear é a garantia de segundo ataque pelos submarinos estratégicos; se adversários desenvolverem redes de UUVs capazes de seguir silenciosamente esses submarinos, colocariam em risco essa garantia, abalando a estabilidade estratégica. Por isso, pode-se argumentar que UUVs têm um potencial estratégico radical, talvez até mais disruptivo que drones aéreos, caso atinjam eficácia elevada, pois o domínio subaquático é o último refúgio da furtividade total.

No âmbito de segurança coletiva e monitoramento de tratados, veículos não tripulados também oferecem potencial. Missões de paz da ONU já usaram drones aéreos para vigiar áreas de conflito e assegurar cumprimento de cessar-fogo (caso da República Democrática do Congo). Futuramente, os UUVs poderiam verificar se regiões marítimas estão livres de armamentos proibidos (quem sabe inspeção de áreas de testes nucleares submersos, etc.). Ou os USVs poderiam monitorar zonas desmilitarizadas fluviais. A versatilidade estratégica desses sistemas permite seu emprego tanto em *hard power* (ações militares diretas) quanto em *soft power* (vigilância, dissuasão e apoio humanitário).

Contudo, o fator contramedidas não pode ser ignorado: à medida que se expandem as capacidades de drones e robôs para ISR, também se intensificam os investimentos em contramedidas tecnológicas. Sistemas anti-drones têm se tornado comuns entre potências militares, incorporando técnicas como interceptadores aéreos, bloqueadores de sinais e armas de energia dirigida, incluindo lasers para neutralização de veículos aéreos não tripulados (Castrillo et al., 2022; Johnson et al., 2023; Valavanis; Vachtsevanos, 2015).

No domínio marítimo, os USVs enfrentam ameaças de destruição por armamentos convencionais de longo alcance antes mesmo de se aproximarem de alvos sensíveis. Já os UUVs, especialmente os autônomos, podem ser detectados por redes avançadas de sensores submarinos passivos, conceito herdado do sistema *Sound Surveillance System (SOSUS)* utilizado durante a Guerra Fria, e hoje

modernizado com técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para identificar padrões acústicos submersos (Byers, 2025; Siciliano; Khatib, 2016).

Táticas de negação e engano também têm sido pesquisadas como forma de despistar sistemas ISR não tripulados, incluindo o uso de iscas, emissores térmicos falsos ou camuflagens adaptativas para confundir sensores infravermelhos de UAVs e detecção eletromagnética de USVs. Esses métodos são apontados como componentes de uma guerra de espectro completo, onde a dissimulação e a saturação de sensores ganham destaque (Bousquet, 2018; Castrillo et al., 2022).

Assim, a arena de missões ISR não tripuladas não é unilateral: ela impulsiona uma corrida tecnológica onde cada avanço em sensores e plataformas autônomas é acompanhado de um esforço paralelo para desenvolver sistemas de detecção, evasão ou destruição dessas mesmas plataformas. A superioridade de ISR, portanto, dependerá não apenas da capacidade de vigiar, mas também da habilidade de se proteger da vigilância adversária e enganá-la eficazmente.

5.3 IMPLICAÇÕES TECNOLÓGICAS E TENDÊNCIAS FUTURAS

Os avanços em sistemas não tripulados para ISR estão fortemente vinculados ao progresso em inteligência artificial, sensoriamento remoto, comunicações, energia e novos materiais. O desenvolvimento dessas tecnologias estimula e é impulsionado por pesquisas em automação, especialmente nos chamados sistemas multiagentes, em que veículos trocam informações e se organizam para executar missões cooperativas, como cercar uma área ou realizar varreduras (De Witt, 2025). Já existem ensaios com enxames de micro-drones em ambientes experimentais, e embora aplicados hoje de forma recreativa, a tecnologia tem aplicação direta em operações militares coordenadas (Arránz et al., 2025).

Esse cenário também levanta desafios de segurança cibernética: em redes colaborativas entre drones, a interceptação de sinais pode comprometer toda a missão. Por isso, o emprego de criptografia robusta e protocolos resilientes é essencial. Outro ponto crítico é o volume de dados gerados: sensores ópticos, radares SAR e sonares coletam quantidades massivas de informação que exigem IA para triagem e análise. Drones modernos já integram algoritmos que identificam padrões ou alvos em tempo real (Valavanis; Vachtsevanos, 2015), acelerando o ciclo OODA (Observar, Orientar, Decidir, Agir) e liberando operadores humanos para

tarefas mais interpretativas. Contudo, isso intensifica o debate ético sobre o uso de algoritmos de decisão autônoma, especialmente em contextos militares sensíveis.

Em termos logísticos, a adoção de sistemas não tripulados modifica a infraestrutura militar: embora drones simples sejam mais baratos que aeronaves tripuladas, sua operação em grande escala demanda centros de comando, redes de satélite e estações de controle. Isso impulsiona modelos híbridos como o *Manned-Unmanned Teaming (MUM-T)*, em que aeronaves ou navios tripulados operam conjuntamente com enxames de veículos não tripulados. Essa sinergia exige interfaces homem-máquina intuitivas, muitas baseadas em realidade aumentada e comandos simplificados (Siciliano; Khatib, 2016).

Além disso, há intensa interação entre os setores civil e militar: o desenvolvimento de drones para agricultura, filmagem ou entregas tem impacto direto sobre as capacidades militares, e vice-versa. Isso implica que regulações civis e tecnologias de uso dual devem ser observadas na formulação de políticas de defesa. Por fim, no plano internacional, a proliferação de drones armados por países médios como Turquia e Irã alterou o equilíbrio regional em conflitos como Líbia, Nagorno-Karabakh e Rússia-Ucrânia. Isso indica que a posse de sistemas ISR avançados pode conferir vantagens assimétricas decisivas, mesmo fora do eixo das grandes potências. A tendência é que, no futuro, cenários de combate contem com o uso intensivo de drones, robôs e veículos autônomos em todos os domínios operacionais.

6 CONCLUSÃO

A presente monografia examinou o emprego de sistemas não tripulados aéreos, de superfície e subaquáticos em missões de ISR, oferecendo uma perspectiva abrangente e comparativa sobre suas aplicações, desafios e implicações estratégicas no contexto internacional contemporâneo. Ao longo da análise, constatou-se que cada uma dessas classes de sistemas vem contribuindo de forma singular para a expansão das capacidades de ISR, ao mesmo tempo em que não está isenta de limitações e riscos que precisam ser gerenciados.

No domínio aéreo, os UAV se consolidaram como ferramentas indispensáveis de ISR, provendo olhos vigilantes nos céus de conflitos e fronteiras. Eles potencializaram a coleta de inteligência com persistência e alcance sem

precedentes, viabilizando desde vigilância de alto nível estratégico (com drones de longa autonomia escaneando territórios inteiros) até apoio tático aproximado (com mini-drones provendo reconhecimento em tempo real para tropas no terreno) (Gertler, 2012). A capacidade de “ver e não ser visto”, outrora ideal, hoje se concretiza nesses veículos, alterando profundamente a condução de operações militares e ações de segurança. Por outro lado, reafirmou-se que os drones não são uma solução definitiva. Pois, sua efetividade plena ocorre em ambientes permissivos ou controlados, sendo desafiados por cenários com defesas aéreas avançadas ou contra um adversário tecnológico paritário (Bousquet, 2018). Ademais, seu uso intensivo levantou dilemas éticos e legais, especialmente quando armados, ao beirar as fronteiras entre a vigilância e a execução letal (Koslowski; Schulzke, 2018). Ainda assim, a tendência é de integração cada vez maior de drones em todas as etapas do ciclo de inteligência e em praticamente todos os teatros de operações, chegando ao ponto de hoje ser difícil imaginar uma operação militar sem algum componente não tripulado coletando informações ou mesmo intervindo.

No âmbito marítimo de superfície, os USVs começam a emergir como extensões da capacidade de sensores navais. Embora ainda em estágios iniciais, seu potencial de cobrir vastas áreas oceânicas de forma contínua e sem arriscar vidas os torna atrativos para patrulha, vigilância costeira e proteção de ativos navais. Os casos experimentais e pilotos operacionais examinados sugerem que, num futuro próximo, veremos patrulhas mistas de navios tripulados e não tripulados, aproveitando o melhor de cada um. Por exemplo, os USVs realizando varreduras persistentes e buscas iniciais, enquanto os navios tripulados efetuam aproximação e ação decisiva quando for necessário. Os desafios de navegação autônoma e comunicação que ainda limitam os USVs tendem a ser superados com rápidos avanços em software e sensoriamento remoto, impulsionados também pela indústria civil (Valavanis; Vachtsevanos, 2015). Assim, os USVs despontam como um multiplicador de força naval e uma forma de aumentar a presença marítima de países com litorais extensos ou interesses em segurança marítima, sem demandar proporcional expansão de pessoal ou de grandes embarcações.

No ambiente subaquático, os UUVs/AUVs demonstraram sua utilidade em nichos críticos de ISR. Como, por exemplo, na guerra de minas, no mapeamento furtivo de áreas e no monitoramento de tráfego submarino. Sua habilidade de operar despercebidos no fundo do mar, fornece às marinhas as capacidades de inteligência

outrora reservadas a operações humanas de alto risco (Siciliano; Khatib, 2016). A pesquisa indicou que, apesar de ainda enfrentarem restrições tecnológicas (sobretudo na autonomia de decisão e transmissão de dados em tempo real), os avanços contínuos em inteligência artificial, energia e materiais prometem tornar esses veículos cada vez mais autônomos, confiáveis e versáteis. Estrategicamente, essa evolução é de suma importância. Pois, num mundo onde comunicações globais dependem de cabos submarinos e onde submarinos nucleares garantem dissuasão, quem dominar a vigilância subaquática obtém considerável vantagem em segurança e poder (Byers, 2025). Portanto, há um ímpeto claro nas grandes potências e aliadas para investir em UUVs e integrá-los a suas estruturas navais de ISR.

Em conclusão, pode-se afirmar que os sistemas não tripulados aéreos, de superfície e subaquáticos já transformaram substancialmente as operações de ISR e continuarão a fazê-lo em grau ainda maior nos anos vindouros. Eles representam a “ponta de lança” de um movimento mais amplo de automação e robotização militar. Aqueles que melhor souberem integrá-los com táticas inteligentes, infraestrutura de análise de dados e contramedidas adequadas colherão supremacia informacional, que é um pilar crucial da superioridade militar no século XXI. Por outro lado, a proliferação dessas tecnologias exigirá prudência e cooperação internacional para evitar instabilidades, seja por uso indevido ou por erros de máquinas não supervisionadas. Assim, o legado final desses sistemas dependerá de como a comunidade global equilibrará inovação tecnológica com responsabilidade estratégica.

Por fim, este trabalho contribuiu para entender os contornos dessa evolução, mas dada a velocidade das mudanças, incentiva-se o acompanhamento contínuo de novos desenvolvimentos e estudos mais aprofundados. Como, por exemplo, sobre enxames cooperativos multi-domínio, defesas anti-drones, e as implicações éticas da inteligência artificial em combate, a fim de manter a atualização da compreensão sobre o emprego de sistemas não tripulados em ISR e em outras funções emergentes.

REFERÊNCIAS

- ARRANZ, R. et al. Application of Deep Reinforcement Learning to UAV Swarming for Ground Surveillance. **Sensors**, v. 23, n. 21, p. 8766, 27 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23218766>. Acesso em: 20 jul 2025.
- AYAMGA, M.; AKABA, S.; NYAABA, A. A. Multifaceted applicability of drones: A review. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 167, p. 120677, jun. 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040162521001098>. Acesso em: 21 abr 2025.
- BAE, I.; HONG, J. Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation. **Sensors**, v. 23, n. 10, p. 4643, 10 maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23104643>. Acesso em: 15 jul 2025.
- BOUSQUET, A. **The Eye of War: Military Perception from the Telescope to the Drone**. [s.l.] University of Minnesota Press, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5749/j.ctv6hp332>. Acesso em: 21 abr 2025.
- BUTTON, R. W. et al. **A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles**. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2009. . Disponível em: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2009/RAND_MG808.pdf. Acesso em: 20 jul 2025.
- BYERS, C. **The Sounds of Silence: Why Undersea Acoustic Networks are Foundational for Naval Warfare**. Disponível em: <https://www.warquants.com/p/the-sounds-of-silence-why-undersea>. Acesso em: 20 jul. 2025.
- CASTRILLO, V. U. et al. A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones. **Drones**, v. 6, n. 3, p. 65, 1 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/drones6030065>. Acesso em: 20 jul 2025.
- CORTES-VEGA, D.; ALAZKI, H.; RULLAN-LARA, J. L. Visual Odometry-Based Robust Control for an Unmanned Surface Vehicle under Waves and Currents in a Urban Waterway. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 3, p. 515, 27 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse11030515>. Acesso em: 15 jul 2025.
- DE WITT, C. S. Open Challenges in Multi-Agent Security: Towards Secure Systems of Interacting AI Agents. **arXiv e-prints**, p. arXiv:2505.02077, 2025. Disponível em: [https://doi.org/ https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.02077](https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.02077). Acesso em: 14 jul 2025.
- EMIMI, M.; KHALEEL, M.; ALKRASH, A. The Current Opportunities and Challenges in Drone Technology . **Int. J. Electr. Eng. and Sustain.**, v. 1, n. 3 SE-Articles, p. 74–89, 20 jul. 2023. Disponível em: <https://ijeess.org/index.php/ijeess/article/view/47>. Acesso em: 21 abr 2025.

FAA. **Integration of Civil Unmanned Aircraft Systems (UAS) in the National Airspace System (NAS) Roadmap – First Edition 2013**. Disponível em: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/uas/resources/policy_library/uas_roadmap_2013.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

GERTLER, J. U.S. unmanned aerial systems. **Congressional Research Service**, p. 1–50, 2012. Disponível em: https://www.congress.gov/crs_external_products/R/PDF/R45757/R45757.78.pdf. Acesso em: 20 jul 2025.

GILLI, A.; GILLI, M. The Diffusion of Drone Warfare? Industrial, Organizational, and Infrastructural Constraints. **Security Studies**, v. 25, n. 1, p. 50–84, 2 jan. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09636412.2016.1134189>. Acesso em: 15 jul 2025.

GU, Y. et al. Unmanned Surface Vehicle Collision Avoidance Path Planning in Restricted Waters Using Multi-Objective Optimisation Complying with COLREGs. **Sensors**, v. 22, n. 15, p. 5796, 3 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22155796>. Acesso em: 15 jul 2025.

HAGEN, P. E. et al. **Military operations with HUGIN AUVs: lessons learned and the way ahead**. Europe Oceans 2005. **Anais...IEEE**, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2005.1513160>. Acesso em: 20 jul 2025

HEO, J.; KIM, J.; KWON, Y. Analysis of Design Directions for Unmanned Surface Vehicles (USVs). **Journal of Computer and Communications**, v. 05, n. 07, p. 92–100, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jcc.2017.57010>. Acesso em: 15 jul 2025.

JOHNSON, B. et al. Counter Directed Energy Weapons and the Defense of Naval Unmanned Aerial Vehicles. **Journal of Directed Energy**, v. 7, n. Winter 2023, p. 163–182, 2023. Disponível em: https://nps.edu/documents/10180/142489929/JDE_7-2_Johnson.pdf. Acesso em: 20 jul 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, p. e507, 6 maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.507>. Acesso em: 20 jul 2025.

KINDERVATER, K. H. The emergence of lethal surveillance: Watching and killing in the history of drone technology. **Security Dialogue**, v. 47, n. 3, p. 223–238, 25 jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0967010615616011>. Acesso em: 21 abr 2025.

KOSLOWSKI, R.; SCHULZKE, M. Drones Along Borders: Border Security UAVs in the United States and the European Union. **International Studies Perspectives**, v.

19, n. 4, p. 305–324, 1 nov. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1093/isp/eky002>. Acesso em: 20 jul 2025.

KUMAR, V.; MICHAEL, N. Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles. **The International Journal of Robotics Research**, v. 31, n. 11, p. 1279–1291, 21 set. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0278364912455954>. Acesso em: 15 jul 2025.

LV, Z. et al. Unmanned Surface Vessels in Marine Surveillance and Management: Advances in Communication, Navigation, Control, and Data-Driven Research. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 13, n. 5, p. 969, 16 maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse13050969>. Acesso em: 14 jul 2025.

MAHADEVAN, P. The Military Utility of Drones. **CSS Analysis in Security Policy**, n. 78, p. 3, 2010. Disponível em: https://www.files.ethz.ch/isn/118844/CSS_Analysis_78.pdf. Acesso em: 14 jul 2025.

MOLLAND, A. F. (ED.). Chapter 10 - Underwater vehicles. In: Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. p. 728–783. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8987-8.00010-X>. Acesso em: 20 jul 2025.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations**. Washington, D.C.: National Academies Press, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/11379>. Acesso em: 20 jul. 2025.

NAVAL-TECHNOLOGY. Ghost Fleet Overlord Unmanned Surface Vessels, USA. **Projects**, 23 mar. 2023. Disponível em: <https://www.naval-technology.com/projects/ghost-fleet-overlord-unmanned-surface-vessels-usa/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

NAVAL-TECHNOLOGY. Maritime Demonstrator for Operational eXperimentation (MADFOX) Uncrewed Surface Vessel, UK. **Projects**, 21 out. 2021. Disponível em: <https://www.naval-technology.com/projects/maritime-demonstrator-for-operational-experimentation-madfox/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

NAVAL-TECHNOLOGY. Orca XLUUV, USA. **Projects**, 19 abr. 2024. Disponível em: <https://www.naval-technology.com/projects/orca-xluuv/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

NOAA. **REMUS AUV Helped Clear Iraqi Port Umm Qasr in 2003 – First Wartime Use of an AUV**. 2018. Disponível em: https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/08auvfest/background/mines/media/onr_remus.html. Acesso em: 20 jul. 2025.

O'ROURKE, R. Navy large unmanned surface and undersea vehicles: Background and issues for Congress. **Congressional Research Service**, 2025. Disponível em:

https://www.congress.gov/crs_external_products/R/PDF/R45757/R45757.78.pdf. Acesso em: 15 jul 2025.

POLVARA, R. et al. Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles. **Journal of Navigation**, v. 71, n. 1, p. 241–256, 10 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0373463317000753>. Acesso em: 15 jul 2025.

ROYAL NAVY. New autonomous vessel delivered to Royal Navy. **Royal Navy News**, 26 mar. 2021. Disponível em: <https://www.royalnavy.mod.uk/news/2021/march/26/210326-madfox-vessel>. Acesso em: 15 jul 2025.

SAVITZ, S. Uncrewed maritime vessels: Shaping naval power in hybrid threat operations. **Hybrid CoE Working Paper 34**, n. October, p. 24, 2024. Disponível em: <https://www.hybridcoe.fi/publications/hybrid-coe-working-paper-34-uncrewed-maritime-vessels-shaping-naval-power-in-hybrid-threat-operations/>. Acesso em: 15 jul 2025.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (EDS.). **Springer Handbook of Robotics**. Cham: Springer International Publishing, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>. Acesso em: 14 jul 2025.

UNITED STATES NAVY. **Ghost Fleet Overlord Unmanned Surface Vessel Program Completes Second Autonomous Transit to Pacific**. Disponível em: <https://www.navy.mil/Press-Office/Press-Releases/display-pressreleases/Article/2649507/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

VALAVANIS, K. P.; VACHTSEVANOS, G. J. (EDS.). **Handbook of Unmanned Aerial Vehicles**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2991983>. Acesso em: 15 jul 2025.

WU, J. et al. Cooperative unmanned surface vehicles and unmanned aerial vehicles platform as a tool for coastal monitoring activities. **Ocean & Coastal Management**, v. 232, p. 106421, fev. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106421>. Acesso em: 15 jul 2025.

WU, Y.; LOW, K. H.; LV, C. Cooperative Path Planning for Heterogeneous Unmanned Vehicles in a Search-and-Track Mission Aiming at an Underwater Target. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 69, n. 6, p. 6782–6787, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2991983>. Acesso em: 21 abr 2025.

YUAN, X. et al. Unmanned Vessel Collision Avoidance Algorithm by Dynamic Window Approach Based on COLREGs Considering the Effects of the Wind and Wave. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 9, p. 1831, 20 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse11091831>. Acesso em: 14 jul 2025.

YUH, J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey. **Autonomous Robots**, v. 8, n. 1, p. 7–24, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1008984701078>. Acesso em: 14 jul 2025.