



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA POLÍTICA E
RELAÇÕES INTERNACIONAIS

FIRST-PERSON-VIEW ATTACK: DRONES FPV E INOVAÇÃO MILITAR NA
GUERRA DA UCRÂNIA (2022-2025)

João Pessoa – PB

Fevereiro de 2026

Cinthya Araújo Gomes

***FIRST-PERSON-VIEW ATTACK: DRONES FPV E INOVAÇÃO MILITAR NA
GUERRA DA UCRÂNIA (2022-2025)***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Política e Relações Internacionais da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciência Política e Relações Internacionais.

Orientador: Prof. Dr. Augusto W. M. Teixeira Júnior

João Pessoa – PB

Fevereiro de 2026

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G633f Gomes, Cinthya Araújo.

First-Person-View attack : drones FPV e inovação
militar na guerra da Ucrânia (2022-2025) / Cinthya
Araújo Gomes. – João Pessoa, 2026.

104 f. : il.

Orientação: Augusto Wagner Menezes Teixeira Júnior.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CCHLA.

1. Inovação militar. 2. Poder aéreo. 3. Drones FPV.
4. Guerra Russo-Ucraniana. I. Teixeira Júnior, Augusto
Wagner Menezes. II. Título.

UFPB/BC

CDU 355.469(043)



Universidade Federal da Paraíba
**CCHLA - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA POLÍTICA E
RELAÇÕES INTERNACIONAIS**

ATA Nº 46

Aos onze dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e seis, às 14h00min, por meio de videoconferência na sala virtual do Google Meet: <https://meet.google.com/pxa-wmfm-quq>, instalou-se a banca examinadora de dissertação de Mestrado da aluna CINTHYA ARAUJO GOMES. A banca examinadora foi composta pelos professores Dr. ANTONIO HENRIQUE LUCENA SILVA, UNICAP, examinador externo à instituição, Dr. SANDRO TEIXEIRA MOITA, IMM/ECEME, da mesma forma, examinador externo à instituição e o Dr. AUGUSTO WAGNER MENEZES TEIXEIRA JUNIOR, UFPB, presidente da banca. Deu-se início a abertura dos trabalhos pelo professor Dr. AUGUSTO WAGNER MENEZES TEIXEIRA JUNIOR, que de imediato solicitou ao candidato que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada FIRST-PERSON-VIEW ATTACK: DRONES FPV E INOVAÇÃO MILITAR NA GUERRA DA UCRÂNIA (2022-2025). Concluída a exposição, o professor Dr. AUGUSTO WAGNER MENEZES TEIXEIRA JUNIOR, presidente, passou a palavra ao professor Dr. ANTONIO HENRIQUE LUCENA SILVA para arguir à candidata, e, em seguida, ao professor Dr. SANDRO TEIXEIRA MOITA para que fizesse o mesmo; após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido aprovado a candidata, conforme as normas vigentes na Universidade Federal da Paraíba.

A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo de 90 dias; contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. A candidata não terá o título se não cumprir as exigências acima.

Dr. ANTONIO HENRIQUE LUCENA SILVA, UNICAP

Examinador(a) Externo(a) à Instituição

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO HENRIQUE LUCENA SILVA**
Data: 11/02/2026 18:54:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. SANDRO TEIXEIRA MOITA, IMM/ECEME

Examinador(a) Externo(a) à Instituição

Documento assinado digitalmente
 **SANDRO TEIXEIRA MOITA**
Data: 11/02/2026 16:18:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. AUGUSTO WAGNER MENEZES TEIXEIRA JUNIOR, UFPB

Presidente(a)

Documento assinado digitalmente
 **AUGUSTO WAGNER MENEZES TEIXEIRA JUNIOR**
Data: 11/02/2026 16:15:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CINTHYA ARAUJO GOMES

Mestrando



Universidade Federal da Paraíba
**CCHLA - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA POLÍTICA E
RELAÇÕES INTERNACIONAIS**

FOLHA DE CORREÇÕES

ATA Nº 46

Autor: CINTHYA ARAUJO GOMES

Título: FIRST-PERSON-VIEW ATTACK: DRONES FPV E INOVAÇÃO MILITAR NA
GUERRA DA UCRÂNIA (2022-2025)

Banca examinadora:

Prof. ANTONIO HENRIQUE LUCENA SILVA

Examinador(a) Externo(a) à
Instituição

Prof. SANDRO TEIXEIRA MOITA

Examinador(a) Externo(a) à
Instituição

Prof. AUGUSTO WAGNER MENEZES TEIXEIRA JUNIOR

Presidente(a)

Os itens abaixo deverão ser modificados, conforme sugestão da banca examinadora.

COMENTÁRIOS GERAIS:

Declaro, para fins de homologação, que as modificações, sugeridas pela banca examinadora, acima mencionadas, foram aceitas e serão cumpridas integralmente.

Prof. AUGUSTO WAGNER MENEZES TEIXEIRA JUNIOR

Orientador

Há quem diga que mães que por muito tempo foram impedidas de correr costumam dar à luz a filhas com asas.

À minha mãe, Gisele, dedico.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional e financeiro que tornou possível a minha permanência na pós-graduação e a realização desta pesquisa.

Agradeço a Deus por me conceder coragem para concluir mais esse nível acadêmico e ser aprovada para iniciar o doutorado. Agradeço a Nossa Senhora por ser a minha luz nas horas mais sombrias e interceder em todas as bênçãos.

Dedico este trabalho, essa titulação e essa graça alcançada à minha família: minha mãe, Gisele; meu pai, Maurício; minha irmã, Glenda; e meus avós, João Bosco e Maria Gilene, que sempre ofereceram suporte afetivo, emocional e estrutural frente à montanha russa que foi o mestrado.

Agradeço aos meus amigos – Eduarda, Ana Beatriz, Débora, Maria Mont’Serrat, Eugênia, Vicente, Nicolas, Vinícius e Davi – que continuaram na jornada comigo por mais dois anos, que acompanharam os altos e baixos de forma fraterna. E também deixo agradecimentos aos camaradas do DPolitik, assim como aos do Grupo de Trabalho “Nelson Werneck Sodré”: Lucas, Léo, Marcello, Dani, Filipe e Robles, sem dúvidas é uma imensa satisfação trabalhar e aprender com vocês.

Agradeço também a uma pessoa indispensável nessa jornada, meu orientador Augusto Teixeira Júnior, que me ofereceu a primeira chance de seguir a carreira acadêmica e se propôs a desafiar minhas capacidades, me ajudando a melhorar minha formação como profissional, cientista e pesquisadora. Também agradeço aos professores Antônio Henrique Lucena Silva e Sandro Teixeira Moita pela leitura, avaliação e extensa devolutiva na banca de defesa do mestrado, que foram essenciais para o aperfeiçoamento do trabalho em sua versão final. No mesmo sentido, não posso deixar de mencionar e agradecer os professores Tamiris Pereira dos Santos e Carlos Eduardo Valle Rosa, que ofereceram imensa contribuição na fase de qualificação.

Agradeço aos amigos e colegas do Grupo de Pesquisa em Estudos Estratégicos e Segurança Internacional (GEESI - UFPB) por todo o acompanhamento da pesquisa e devolutivas valiosas, especialmente Raphaela, André, Eduardo e Horácio; e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Política e Relações Internacionais, em especial ao professor

Henrique Zeferino Menezes, um excelente coordenador, e todo o corpo docente extremamente qualificado.

Agradeço a todas as pessoas que estiveram presentes na minha vida durante esse período, como diz o ditado *“it takes a village”*, e o apoio da minha comunidade foi fundamental para renovar o ânimo e a coragem de continuar a jornada.

Por fim, como disse Vladimir Lenin: “É preciso sonhar, mas com a condição de crer em nosso sonho, de observar com atenção a vida real, de confrontar a observação com nosso sonho, de realizar escrupulosamente nossas fantasias. Sonhos, acredite neles.” Foi acreditando nesse sonho a ser realizado que concretizei a conquista deste diploma.

A guerra é o pai de todas as coisas e de todas o rei; de uns fez deuses, de outros, homens; de uns fez escravos, de outros, livres.

Heráclito

RESUMO

A Ucrânia tem empregado drones aéreos de Classe 1 e 2, especialmente *first-person-view* (FPV), de forma intensiva em sua defesa contra a invasão russa desde 2022, ampliando o debate sobre o papel do poder aéreo em conflitos assimétricos e de alta intensidade. Nesse contexto, em que estágio do processo de inovação militar se encontra o emprego de drones aéreos *first-person-view* (FPV) pela Ucrânia? Parte-se da hipótese de que os drones não constituem apenas soluções improvisadas e conjunturais, mas elementos centrais de um processo de adaptação militar com potencial inovador, capaz de ampliar a capacidade operacional de um ator em desvantagem estratégica por meio de meios de baixo custo e elevada adaptabilidade. A pesquisa fundamenta-se na Teoria da Inovação Militar e nos estudos clássicos e contemporâneos sobre poder aéreo, adotando uma abordagem qualitativa e estruturando-se como estudo de caso único do conflito no período de 2022 a 2025. Os dados foram coletados a partir de documentos primários, como relatórios militares e registros oficiais, e fontes secundárias, incluindo análises de *think tanks* e literatura especializada. A análise organiza-se em três eixos principais: (1) inovação tecnológica, examinando a adaptação de drones comerciais e sua integração a missões de reconhecimento, correção de fogos e ataque; (2) inovação organizacional, observada na descentralização produtiva, na participação de redes civis e na articulação entre Estado, Forças Armadas e sociedade civil; e (3) inovação doutrinária, relacionada à emergência de novas práticas tático-operacionais no emprego do poder aéreo em ambiente altamente contestado. Conclui-se que o caso ucraniano representa um processo de adaptação tática altamente eficaz, com potencial inovador, no qual limitações materiais e pressão operacional contínua catalisam criatividade organizacional e novas formas de geração de poder militar, ainda que sem caracterizar, até o momento, uma inovação militar plenamente consolidada.

Palavras-chave: Poder Aéreo; Inovação Militar; Drones FPV; Guerra russo-ucraniana.

FIRST-PERSON-VIEW ATTACK: FPV DRONES AND MILITARY INNOVATION IN THE UKRAINE WAR (2022–2025)

ABSTRACT

Ukraine has been using Class 1 and 2 aerial drones, especially first-person-view (FPV) drones, intensively in its defence against the Russian invasion since 2022, broadening the debate on the role of air power in asymmetric and high-intensity conflicts. In this context, at what stage of the military innovation process is Ukraine's employment of first-person-view (FPV) aerial drones? The starting point is the hypothesis that drones are not just improvised short-term solutions, but central elements of a military adaptation process with innovative potential, capable of expanding the operational capacity of a strategically disadvantaged actor through low-cost and highly adaptable means. The research is based on Military Innovation Theory and classic and contemporary studies on air power, adopting a qualitative approach and structured as a single case study of the conflict in the period from 2022 to 2025. Data were collected from primary documents, such as military reports and official records, and secondary sources, including think tank analyses and specialised literature. The analysis is organised into three main areas: (1) technological innovation, examining the adaptation of commercial drones and their integration into reconnaissance, fire correction and attack missions; (2) organisational innovation, observed in the decentralisation of production, the participation of civilian networks, and the coordination between the state, the armed forces, and civil society; and (3) doctrinal innovation, related to the emergence of new tactical and operational practices in the use of air power in a highly contested environment. It can be concluded that the Ukrainian case represents a highly effective tactical adaptation process with innovative potential, in which material limitations and continuous operational pressure catalyse organisational creativity and new forms of military power generation, even though it does not yet constitute a fully consolidated military innovation.

Keywords: Air Power; Military Innovation; FPV Drones; Ukraine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E FIGURAS

FIGURA 1 – Modelo de Inovação Militar a partir de Horowitz e Pindyck (2023)

FIGURA 2 – Dimensões do drone *RQ-4 Global Hawk* e variações

FIGURA 3 – Dimensões do drone *MQ-9 Reaper*

FIGURA 4 – Força militar antes da invasão da Rússia

FIGURA 5 – Mapa de cobertura do A2/AD no leste europeu

FIGURA 6 – Ecossistema de Inovação de Defesa da Ucrânia: ciclo de *feedback* e produção

FIGURA 7 – Mapa das partes interessadas na IA militar na Ucrânia

FIGURA 8 – Interação entre adaptação tática e ruptura tecnológica na Ucrânia (2022-2025)

FIGURA 9 – Comparativo de estruturas de comando e ciclo de decisão

FIGURA 10 – Granada VOG-17 modificada para ser lançada a partir de um drone

FIGURA 11 – Granada RKG-3 modificada para ser lançada a partir de um drone

FIGURA 12 – Bases aéreas russas atacadas durante operação com drones ucranianos

FIGURA 13 – Assimetria de custos

FIGURA 14 – Ilustração dos *cope cages*

FIGURA 15– Ciclo Operacional: integração drone-artilharia

FIGURA 16 – O dilema da inovação em guerra

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1 – Referencial teórico sintetizado

QUADRO 2 – Indicadores empíricos da variável dependente (grau de inovação militar)

QUADRO 3 – Relação entre hipóteses, variáveis e observáveis para o teste de congruência

QUADRO 4 – Era dos Drones e características do emprego militar

QUADRO 5 – Classificação de *Uncrewed Aerial Systems* (UAS) da OTAN

QUADRO 6 – Ajuda militar enviada à Ucrânia entre 24 de janeiro de 2022 e fevereiro de 2025

QUADRO 7 – Efeitos diretos e indiretos dos drones FPV

QUADRO 8 – Invenção (Horowitz; Pindyck, 2023)

QUADRO 9 – Incubação (Horowitz; Pindyck, 2023)

QUADRO 10 – Implementação (Horowitz; Pindyck, 2023)

QUADRO 11 – Evidências observadas no caso ucraniano e teste de congruência das H1

QUADRO 12 – Evidências observadas no caso ucraniano e teste de congruência das H2

QUADRO 13 – Evidências observadas no caso ucraniano e teste de congruência das H0

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGL	<i>Above Ground Level</i> (acima do nível do solo)
AI / IA	<i>Artificial Intelligence</i> / Inteligência Artificial
ATO	<i>Air Tasking Order</i> (ordem de tarefas aéreas)
BLOS	<i>Beyond Line of Sight</i> (além da linha de visão)
C2	<i>Command and Control</i> (Comando e Controle)
C4ISR	<i>Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i> (Comando, Controle, Comunicações, Computação, Inteligência, Vigilância e Reconhecimento)
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CONOPS	<i>Concept of Operations</i> (Conceito de Operações)
CSIS	<i>Center for Strategic and International Studies</i>
DoD	<i>Department of Defense</i> (Departamento de Defesa dos Estados Unidos)
DJI	<i>Da-Jiang Innovations</i> (empresa chinesa fabricante de drones)
EW	<i>Electronic Warfare</i> (Guerra Eletrônica)
FPV	<i>First-Person View</i> (Visão em Primeira Pessoa)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HALE	<i>High Altitude Long Endurance</i> (Grande altitude e longa duração)
IISS	<i>International Institute for Strategic Studies</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i> (Sistema de Navegação Inercial)
ISR	<i>Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i> (Inteligência, Vigilância e Reconhecimento)
ISTAR	<i>Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance</i> (Inteligência, Vigilância, Aquisição de Alvos e Reconhecimento)
JTF	<i>Joint Task Force</i> (Força-Tarefa Conjunta)

LOS	<i>Line of Sight</i> (Linha de visão)
MALE	<i>Medium Altitude Long Endurance</i> (Média altitude e longa duração)
MWS	<i>Major Weapon Systems</i>
MoD	<i>Ministry of Defense of Ukraine</i> (Ministério da Defesa da Ucrânia)
MSL	<i>Mean Sea Level</i> (nível médio do mar)
NATO / OTAN	<i>North Atlantic Treaty Organization</i> (Organização do Tratado do Atlântico Norte)
PGM	<i>Precision Guided Munition</i> (Munição Guiada de Precisão)
RMA	<i>Revolution in Military Affairs</i> (Revolução em Assuntos Militares)
RUSI	<i>Royal United Services Institute</i>
SARP	Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas
SIGINT	<i>Signals Intelligence</i> (Inteligência de Sinais)
UAS	<i>Uncrewed Aerial Systems</i> (Sistemas Aéreos Não Tripulados)
UAV	<i>Uncrewed Aerial Vehicle</i> (Veículo Aéreo Não Tripulado)
USF	<i>Unmanned Systems Forces</i> (Força de Sistemas Não Tripulados – Ucrânia)
UNODA	<i>United Nations Office for Disarmament Affairs</i> (Escritório das Nações Unidas para Assuntos de Desarmamento)
V.D.	Variável Dependente
V.I.	Variável Independente
VTOL	<i>Vertical Take-Off and Landing</i> (Decolagem e Pouso Vertical)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1 BASE TEÓRICA E METODOLÓGICA NO ESTUDO DA INOVAÇÃO MILITAR	17
1.1 Mudança militar e Revolução em Assuntos Militares (RMA)	17
1.2 Inovação militar e modelo de Horowitz e Pindyck (2023).....	23
1.3 Metodologia, desenho de pesquisa e hipóteses	32
2 OS DRONES NO CONTEXTO DA GUERRA RUSSO-UCRANIANA.....	40
2.1 Drones e poder aéreo: transformações contemporâneas.....	40
2.2 A guerra russo-ucraniana e os drones aéreos.....	47
2.3 O emprego dos drones pela Ucrânia e o papel do ecossistema ucraniano	56
3 OS DRONES FPV NA ESCALA DE INOVAÇÃO MILITAR UCRANIANA.....	71
3.1 Efeitos táticos e operacionais dos drones FPV: os drones como multiplicadores de força	71
3.2 Aplicação do modelo de Horowitz e Pindyck (2023) ao caso ucraniano: análise de congruência e das hipóteses.....	80
3.2.1 <i>Invenção, incubação e implementação</i>	81
3.2.2 <i>Análise de congruência e teste das hipóteses</i>	87
CONCLUSÃO.....	91
REFERÊNCIAS	96

INTRODUÇÃO

A invasão da Ucrânia pela Federação Russa, em fevereiro de 2022, reafirmou um padrão historicamente recorrente nos estudos sobre guerra e tecnologia: conflitos armados tendem a criar condições propícias para a experimentação, adaptação e aperfeiçoamento de meios militares. Apesar de ser um conflito de alta intensidade, o panorama na Ucrânia foi se alterando, mesmo que ainda sob um contexto de emprego de capacidades e meios tradicionais – como carros de combate, artilharia e aviões tripulados – mas intensificando o uso dos *Uncrewed Aerial Vehicles* (UAVs), comumente chamados de drones.¹

O contexto da guerra da Ucrânia permite observar, em escala inédita, o emprego intensivo de drones – especialmente drones aéreos *first-person-view* (FPV). O deslocamento progressivo entre capacidades por parte da Ucrânia não se deu de forma abrupta, mas o emprego de drones FPV é resultado da interação entre restrições operacionais, escassez material, adaptação tática e difusão acelerada de tecnologias de uso dual para lidar com as condições de assimetria frente à Rússia (Fedorchak, 2024). Nesse caso, em que estágio do processo de inovação militar se encontra o emprego de drones aéreos *first-person-view* (FPV) pela Ucrânia?

Sob esta perspectiva, a guerra russo-ucraniana oferece um campo empírico privilegiado para analisar as transformações contemporâneas do poder aéreo. Longe de se limitar à aviação tripulada ou à busca por superioridade aérea clássica, o poder aéreo passou a incorporar, de maneira cada vez mais significativa, sistemas não tripulados de baixo custo, elevada disponibilidade e rápida adaptabilidade. O emprego combinado de drones, capacidades de guerra eletrônica (*Electronic Warfare* - EW) e ferramentas de inteligência artificial (IA) ilustra como a tecnologia tem ocupado mais espaço na condução da guerra moderna, especialmente em ambientes caracterizados por elevada contestação do espaço aéreo e forte assimetria de recursos (Fedorchak, 2024).

O poder aéreo pode ser compreendido como o uso de aeronaves e tecnologias associadas para conduzir operações militares, exercer influência e alcançar objetivos estratégicos e políticos (Rosa; Jasper, 2018). Historicamente, esse domínio esteve fortemente condicionado pelo avanço tecnológico, o que moldou não apenas suas capacidades, mas também suas limitações e formas de emprego (Rosa, 2014; Fedorchak, 2020; Rogers, 2024). Contudo, as transformações observadas na guerra da Ucrânia sugerem que o poder aéreo contemporâneo

¹ O Escritório das Nações Unidas para Assuntos de Desarmamento (UNODA) utiliza a denominação *Uncrewed Systems* (US), com foco no sistema completo de armas, e *Uncrewed Aerial Vehicle* (UAV), com foco no veículo. No Brasil, a nomenclatura utilizada é Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (SARP). No entanto, neste trabalho os termos drones, drones aéreos e a sigla UAV são utilizados como sinônimos.

não se resume à projeção de poder por meio de plataformas tripuladas de alto custo, mas envolve crescente flexibilidade operacional, integração em redes e incorporação de sistemas não tripulados acessíveis, capazes de operar sob condições de elevado risco e atrito.

À princípio, a literatura especializada apontou que os drones ampliaram as capacidades tradicionais do poder aéreo ao oferecer vigilância persistente, maior precisão e redução do risco direto para operadores humanos (Watling, 2023; Kunertova, 2023a). Logo, o caso ucraniano também se destaca por sua dimensão sociotécnica. Para além da aquisição de drones comerciais adaptados, observam-se investimentos estatais na indústria tecnológica local, a mobilização de redes civis, iniciativas de financiamento coletivo (*crowdfunding*) e a integração entre Estado, Forças Armadas e sociedade civil, fatores que contribuíram para sustentar o fluxo de equipamentos às unidades de linha de frente (Fedorchak, 2024). Esse arranjo confere ao caso ucraniano relevância analítica adicional, especialmente quando analisado sob condições de assimetria material frente à Rússia.

Por sua vez, em que medida o caso ucraniano é útil para generalização acerca da inovação militar, com lições relevantes inclusive para o Brasil? No cenário brasileiro, há exemplos de empresas de tecnologia capazes de produzir internamente, como a *Nest Design Aerospace*, que em março de 2025 apresentou um modelo de drone movido à jato produzido inteiramente no Brasil (Martins, 2025); e a Xmobots, que já possui o Nauru 1000C ISTAR, de categoria 2, auxiliando o Exército Brasileiro no monitoramento das fronteiras brasileiras (Bastos Júnior, 2024).

Importante destacar que o presente trabalho não se propõe a ser uma pesquisa comparativa, e mantém o foco no estudo de caso único sobre a inovação militar ucraniana. No entanto, o caso da Ucrânia pode oferecer subsídios analíticos para países como o Brasil, os quais tenham problemas derivados de um modelo orçamentário restritivo, dependente da importação de componentes eletrônicos em áreas sensíveis, ao mesmo tempo que tenta se adaptar aos padrões contemporâneos de defesa. Dessa forma, a escolha de abordar a Guerra da Ucrânia não se justifica apenas pela atualidade, mas pela capacidade de análise da articulação entre elementos tradicionais da guerra convencional e inovações tecnológicas. Tal abordagem não somente contribui para a compreensão do papel crescente dos drones, mas também pode-se extrair lições valiosas para o futuro da guerra.

Logo, tendo em vista tanto a relevância temática quanto a oportunidade de contribuir para essa área pouco explorada na literatura especializada brasileira, a presente dissertação tem como objetivo analisar em que estágio do processo de inovação militar se encontra o emprego de drones FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia. Considerando esses elementos, e de modo a

atingir o objetivo de pesquisa, utilizamos uma abordagem qualitativa e estruturamos como estudo de caso único a guerra em curso entre Rússia e Ucrânia, especificamente o período compreendido entre fevereiro de 2022 e agosto de 2025. O método operado é a análise de congruência, que permite confrontar expectativas teóricas concorrentes com evidências empíricas observáveis, sem buscar inferência causal estatística, mas sim inferência analítica e descritiva.

O desenho de pesquisa fundamenta-se no modelo de inovação militar proposto por Horowitz e Pindyck (2023), que define inovação como mudanças na conduta da guerra capazes de aumentar a capacidade de uma comunidade militar de gerar poder, concebendo esse processo de forma gradual e processual, a partir das etapas de invenção, incubação e implementação. Embora os autores não estipulem categorias fixas de intensidade, o modelo processual permite inferir uma graduação baseada no alcance da inovação. Assim, para fins analíticos operacionalizamos o modelo em três níveis: (1) baixa intensidade (adaptação tática), restrita à fase de invenção e pequenos incrementos restritos; (2) média intensidade, caracterizado pelo sucesso na fase de incubação e difusão parcial, mas sem reconfiguração estrutural plena; e (3) alta intensidade (*major innovation*), que corresponde à fase de implementação completa, com alterações profundas na doutrina e na estrutura organizacional.

Com base nesse referencial, e na gradação a partir do modelo de Horowitz e Pindyck (2023) são testadas três hipóteses: (H1) o emprego de drones FPV se localiza no estágio de inovação militar de alta intensidade; (H2) trata-se de uma adaptação tática contingencial e descentralizada, sem consolidação estrutural; e (H0) o fenômeno não demonstra relevância no estágio de inovação militar,

Isto posto, a dissertação está organizada da seguinte forma: O Capítulo 1 apresenta a base teórica e metodológica do trabalho, discutindo o debate sobre mudança militar, inovação e poder aéreo, bem como o desenho de pesquisa e as hipóteses adotadas. A seguir, o Capítulo 2 analisa o caso ucraniano em profundidade, contextualizando a guerra russo-ucraniana, o emprego dos drones pelas Forças Armadas da Ucrânia e o papel do ecossistema sociotécnico que sustenta a inovação. Por fim, o Capítulo 3 constitui o núcleo analítico da dissertação, no qual o modelo de Horowitz e Pindyck é aplicado ao caso ucraniano por meio da análise de congruência, avaliando os efeitos táticos e operacionais do emprego de drones FPV e testando as hipóteses propostas.

1 BASE TEÓRICA E METODOLÓGICA NO ESTUDO DA INOVAÇÃO MILITAR

No presente capítulo, apresentamos a base teórica e metodológica utilizada pela pesquisa. Na subseção 1.1, de título “Mudança militar e Revolução em Assuntos Militares (RMA)”, abordamos as conceituações teóricas sobre mudança, adaptação à luz do principal referencial teórico. Logo, trata-se de uma seção em que tratamos das formulações conceituais e do enquadramento analítico selecionado para orientar a presente dissertação.

Na subseção 1.2 “Inovação militar e modelo de Horowitz e Pindyck (2023)” abordamos as conceituações acerca da inovação militar, como um deslocamento teórico-analítico que buscou se afastar do determinismo da RMA. Para além disso, apresentamos o conceito e o modelo teórico processual proposto por Horowitz e Pindyck (2023). Logo, trata-se de uma seção em que tratamos das formulações conceituais e do enquadramento analítico selecionado para orientar a presente dissertação.

Ademais, na subseção 1.3 “Metodologia, desenho de pesquisa e hipóteses”, nos dedicamos a expor a estratégia adotada no trabalho, apresentado brevemente os fundamentos do método de estudo de caso, análise de congruência e as justificativas para a escolha do caso ucraniano como campo empírico. Não obstante, também apresentamos as hipóteses do trabalho, derivadas do modelo teórico de inovação militar que serve de base para a análise dos capítulos seguintes.

1.1 Mudança militar e Revolução em Assuntos Militares (RMA)

O debate sobre mudança militar se configura como um campo teórico e conceitual amplo, ainda sem muito consenso embora prolífico, envolve desde perspectivas que veem o fenômeno à luz de ajustes incrementais até rupturas profundas na condução da guerra (Posen, 1984; Knox; Murray, 2001; Grissom, 2006; Adamsky, 2010). Desde as formulações clássicas do pensamento estratégico, a guerra é compreendida como um fenômeno social e político dinâmico, profundamente condicionado por transformações no ambiente material, institucional e normativo em que se desenvolve (Clausewitz, 1984; Howard, 2009; Zweibelson, 2023). Nesse sentido, as formas de condução da guerra não permanecem estáticas, mas evoluem em resposta às mudanças tecnológicas, organizacionais e sociopolíticas.

Michael Howard (2009) observa que a adaptação militar tende a ocorrer de maneira imperfeita, normalmente apenas iniciada após as primeiras hostilidades, quando as forças armadas são confrontadas com realidades para as quais não estavam plenamente preparadas. Para o autor, existe um descompasso entre as guerras para as quais os militares se prepararam

e aquelas que efetivamente enfrentam, o que acaba por conferir uma perspectiva reativa no processo de mudança militar. Logo, essa constatação abre espaço para uma interpretação que enfatiza o aprendizado em combate na centralidade da mudança militar.

Ao final do século XX, os debates em torno da mudança militar ganham mais uma perspectiva analítica, com a consolidação de uma literatura mais voltada à compreensão histórica e organizacional da transformação da guerra. Como argumentado por Knox e Murray (2001), as mudanças significativas na condução dos conflitos emergem da interação entre fatores tecnológicos, doutrinários, organizacionais e políticos. Para esses autores, a simples introdução de novas tecnologias não é suficiente para produzir mudanças profundas, sendo necessária sua integração a novas concepções de emprego, estruturas organizacionais e formas de comando (Sloan, 2008; Krepinevich, 1994; Krepinevich, 2023).

Historicamente, a literatura de estudos estratégicos tem sido marcada por uma divisão teórica que separa os fenômenos de mudança em “tempos de paz” e “tempos de guerra”. Berthelsen (2025) e Terhorst (2025) analisam que as teorias clássicas tendem a associar a inovação a processos planejados, proativos e *top-down*, reflexos do período de estabilidade, enquanto que a guerra seria o domínio da adaptação reativa, urgente e *bottom-up*. Contudo, o ambiente de segurança contemporâneo, caracterizado por competição persistente e *gray zones*, desafiando a ideia de categorização binária, sugerindo que a mudança organizacional ocorre em um continuum onde a busca por estabilidade e a necessidade de inovação coexistem (Grissom, 2006; Horowitz; Pindyck, 2023; Terhorst, 2025).

Nesse contexto, a literatura passou a distinguir diferentes tipos e níveis de mudança militar. Grissom (2006), propõe uma diferenciação analítica entre mudança incremental, adaptação e inovação, alertando para os riscos do uso indiscriminado desses conceitos. As mudanças incrementais referem-se a ajustes contínuos em táticas, técnicas e procedimentos, geralmente conduzidos no nível tático-operacional, sem implicar alterações substanciais na estrutura ou na doutrina das forças armadas. Portanto, essas mudanças são esperadas e, em certa medida, necessárias para a manutenção da eficácia militar², mas possuem efeitos limitados no longo prazo (Farrell; Terriff; Osinga, 2014).

Por sua vez, a adaptação militar costuma ser entendida como uma resposta contingente a desafios específicos impostos pelo ambiente operacional, especialmente em contextos de

² Neste trabalho, eficácia militar é compreendida como a capacidade de uma força armada gerar efeitos militares relevantes em relação aos objetivos estabelecidos, considerando as restrições materiais, organizacionais, temporais e políticas do conflito. Tal noção enfatiza a relação entre meios empregados, efeitos produzidos e custos incorridos, não devendo ser confundida com sucesso estratégico ou político duradouro (Olsen, 2010; Haun; Jackson; Schultz, 2022).

guerra. Hoffman (2021) argumenta que a adaptação emerge como um mecanismo pragmático de sobrevivência, orientado pela urgência e pela necessidade de responder rapidamente às ações do adversário. Embora processos adaptativos possam gerar aprendizado significativo, eles nem sempre se consolidam em mudanças duradouras, podendo ser abandonados após o término do conflito ou diante de novas prioridades institucionais (Adamsky, 2010; Hoffman, 2021; Slusher, 2025).

Nesse sentido, a distinção entre adaptação e inovação se torna relevante, pois ambas podem ocorrer simultaneamente e, em certos casos, serem confundidas. Farrell, Terriff e Osinga (2014) destacam que a adaptação em combate tende a ser fragmentada, descentralizada e orientada para resultados imediatos, enquanto a inovação pressupõe algum grau de institucionalização e difusão organizacional. Assim, nem toda adaptação configura inovação militar, embora possa, em condições específicas, servir como ponto de partida para processos inovadores mais amplos (Rosen, 1991; Horowitz; Pindyck, 2023).

Outro eixo central do debate sobre mudança militar refere-se às características organizacionais das forças armadas. A literatura em sociologia militar enfatiza que organizações militares tendem a ser burocráticas, hierárquicas e normativamente rígidas, características que garantem disciplina, controle e previsibilidade, mas que também podem dificultar processos de mudança profunda (Posen, 1984; Soeters *et al.*, 2006; Zweibelson, 2023). Essas características moldam a forma como novas ideias são recebidas, testadas e, eventualmente, institucionalizadas.

Holmberg e Alvinus (2019) contribuem para a discussão ao analisar como diferentes tipos de pressão: estrutural, normativa e funcional, desafiam as características tradicionais das organizações militares. Segundo os autores, pressões normativas, associadas a mudanças de valores sociais, expectativas democráticas e demandas por legitimidade, tendem a gerar tensões maiores, pois questionam identidades profissionais e padrões consolidados de autoridade. Logo, essas pressões podem tanto estimular mudanças quanto reforçar resistências organizacionais, dependendo da capacidade da instituição de absorvê-las (Holmberg; Alvinus, 2019; Gruszczak; Kaempf, 2021).

Além disso, estudos sobre mudança organizacional no setor de defesa destacam que forças armadas frequentemente enfrentam dilemas entre eficiência operacional e preservação de identidades institucionais (Soeters *et al.*, 2006; King, 2011; Zweibelson, 2023). Não obstante, a gestão desse dilema influencia diretamente a trajetória da mudança militar, determinando se ajustes permanecem no nível incremental ou se evoluem para transformações mais profundas.

Dessa forma, a mudança militar deve ser compreendida como um processo multifacetado no qual ajustes incrementais, adaptações contingentes e tentativas de transformação coexistem e se sobrepõem (Murray; Knox, 2001; Adamsky, 2010). Portanto, o desafio analítico consiste em identificar quando essas mudanças ultrapassam o nível tático-operacional e passam a afetar dimensões mais profundas da organização militar, como doutrina, estrutura de forças e concepções estratégicas. E esse desafio se torna mais relevante no contexto contemporâneo, marcado pela rápida difusão de novas tecnologias, pela reinvenção das mesmas e pela tendência de descrevê-las de forma acrítica como intrinsecamente transformadoras no campo de batalha (Sloan, 2008; Martyanov, 2019; Watling, 2023).

Assim, o debate sobre mudança militar fornece o pano de fundo conceitual para a discussão sobre inovação. Ao reconhecer que a mudança é inerente à guerra, a literatura também evidencia a necessidade de critérios rigorosos que permitam diferenciar adaptações circunstanciais de processos de inovação militar propriamente ditos, evitando o esvaziamento do conceito.

No interior do debate mais amplo sobre mudança militar, a noção de Revolução em Assuntos Militares (*Revolution in Military Affairs* - RMA) ocupou posição de destaque a partir do final da Guerra Fria. O conceito foi amplamente mobilizado para descrever períodos históricos em que a convergência entre novas tecnologias, mudanças organizacionais e inovações doutrinárias teria produzido transformações profundas e relativamente rápidas na condução da guerra, redefinindo os parâmetros da eficácia militar (Krepinevich, 1994; Sloan, 2008; Olsen, 2010).

Andrew Krepinevich (2023) argumenta que determinadas inovações tecnológicas, quando adequadamente integradas à doutrina e à organização militar, podem gerar novas “teorias da vitória”, capazes de alterar decisivamente o equilíbrio entre adversários. Entre os exemplos históricos, inclui-se a Blitzkrieg alemã de 1940, e o emprego das munições guiadas de precisão (*Precision Guided Munitions* – PGMs) pelos Estados Unidos na Primeira Guerra do Golfo (1990-1991) (Sloan, 2008; Olsen, 2010; Krepinevich, 1994; Krepinevich, 2023). Nessa perspectiva, a RMA é concebida como um processo de ruptura, no qual Estados que conseguem explorar essas transformações obtêm vantagens militares duradouras.

A literatura clássica sobre mudança militar distingue entre sistemas de armas principais (*Major Weapon Systems* – MWS) e capacidades complementares ou auxiliares (Posen, 1984). Os MWS caracterizam-se por elevado custo unitário, ciclos longos de desenvolvimento, alta complexidade tecnológica e forte dependência de complexos industriais de defesa consolidados, exemplificados por aeronaves de combate, carros de combate e plataformas

navais de grande porte (Buzan; Hering, 1998; Rosen, 1991). Em geral, esses sistemas demandam planejamento centralizado, investimentos de longo prazo e integração estrutural à doutrina e à organização militar.

Nesse contexto, a maior parte do debate sobre RMA concentrou-se historicamente na transformação associada a esses sistemas de alto valor, especialmente quando integrados a novas arquiteturas de comando, controle e inteligência (Sloan, 2008; Krepinevich, 2023). Entretanto, o caso ucraniano, portanto o foco do presente trabalho, sugere uma dinâmica distinta. Os drones FPV não configuram MWS no sentido clássico, tampouco substituem plataformas tradicionais. Seus efeitos ressoam na capacidade de contestar sistemas de alto valor, sendo vetores de baixo custo, impondo uma assimetria financeira e operacional significativa.

A literatura sobre RMA enfatizou, assim, o papel central das tecnologias da informação, da guerra em rede e da integração entre diferentes domínios operacionais. Autores como Sloan (2008) e Jensen *et al.* (2022) destacam que essas transformações teriam alterado não apenas os meios da guerra, mas também sua lógica operacional, privilegiado velocidade, precisão e superioridade informacional (Sloan, 2008; Jensen et al., 2022; Fedorchak, 2020). Todavia, Adamsky e Bjerga (2012) destacam que as mudanças propostas pela RMA não são necessariamente uniformes, podendo variar conforme o grau de adaptação doutrinária de cada força armada. Nesse enquadramento, a inovação militar aparece fortemente associada à incorporação de tecnologias avançadas e à capacidade de explorá-las de forma sistêmica.

Entretanto, a partir das experiências no Afeganistão e no Iraque, emergiram críticas substantivas a essa abordagem. Estudos posteriores apontaram que a ênfase excessiva no determinismo tecnológico levou a expectativas infladas quanto à capacidade de certas inovações produzirem efeitos estratégicos decisivos de forma automática (Sloan, 2008; Martyanov, 2019; Rogers, 2024). Apesar da superioridade tecnológica evidente, forças armadas ocidentais enfrentaram dificuldades prolongadas para converter vantagens militares em resultados políticos sustentáveis, revelando os limites às promessas da RMA.

Um exemplo histórico ilustrativo para distinguir a mera introdução de uma nova tecnologia de sua consolidação como inovação militar é o caso do caça P-51 *Mustang* durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945). O sucesso desse modelo não se deu apenas pelo aprimoramento em sua engenharia, mas na confluência entre o aumento de autonomia de voo, ou seja, a integração de tanques de combustíveis suplementares (*drop tanks*) que possibilitou maior tempo em ação, associado com a readequação doutrinária, uma vez que os P-51 começaram a atuar como escolta de bombardeiros estratégicos até o centro do território alemão (Olsen, 2010).

Este caso, portanto, exemplifica a complexidade da “dinâmica de armamentos” descrita por Buzan e Herring (1998), segundo a qual o valor estratégico de um sistema de armas não é intrínseco à sua tecnologia, mas depende de sua articulação com a postura doutrinária e a estrutura organizacional que o emprega. Logo, a inovação do caça P-51 se manifestou na superação de gargalos operacionais críticos através dessa integração, alterando a forma como a campanha aérea aliada pôde ser sustentada.

Além disso, críticos argumentam que o conceito de RMA tende a obscurecer processos graduais e cumulativos de mudança, privilegiando narrativas de ruptura em detrimento de análise de aprendizagem organizacional e adaptação incremental (Grissom, 2006; Hoffman, 2021). Nesse sentido, Adamsky (2010) aponta que muitas transformações atribuídas a supostas revoluções militares resultaram, na prática, de processos longos, não lineares e fortemente condicionados por culturas estratégicas nacionais. Por sua vez, Berthelsen (2025) aponta que as teorias tradicionais muitas vezes negligenciam como o *feedback* do combate pode interagir com estruturas burocráticas para gerar inovação duradoura, não apenas ajustes temporários (Murray, 2020). Nesse sentido, ao contrário do que sugeriam as formulações iniciais do debate, a inovação militar mostrou-se menos previsível e mais dependente do contexto institucional (Terhorst, 2025).

Não obstante, outro limite relevante da abordagem RMA refere-se à sua aplicabilidade em contextos não hegemônicos, aqui entendidos como aqueles em que os atores carecem de superioridade material, tecnológica e institucional para moldar o ambiente estratégico de forma autônoma (Adamsky, 2010; Zysk, 2021). A maior parte da literatura foi construída a partir da experiência de grandes potências industriais, especialmente dos Estados Unidos, o que restringe sua capacidade explicativa para casos de atores que operam sob condições de escassez material, dependência tecnológica e pressão operacional contínua (Adamsky, 2010; Hoffman, 2021; Slusher, 2025). Em tais contextos, a inovação tende a emergir de forma descentralizada, improvisada e incremental, frequentemente fora dos canais formais de planejamento estratégico (Adamsky, 2010; Hoffman, 2021).

Por sua vez, a posição tecnofílica³ das RMA foi posteriormente exportada para países aliados da OTAN sob o termo de Transformação Militar, mas também para adversários, como

³O termo “tecnofílico” (ou tecno-fetichismo militar) refere-se a uma abordagem doutrinária que atribui centralidade excessiva à superioridade tecnológica como determinante principal do sucesso militar, em detrimento de fatores humanos, políticos e culturais. Na literatura de Estudos Estratégicos, essa crítica é frequentemente direcionada às concepções de RMA da década de 1990, que presumiam que a “névoa da guerra” poderia ser dissipada inteiramente por meio de sensores, redes de dados e PGMs, subestimando a capacidade de adaptação assimétrica do adversário (Gray, 2003; Biddle, 2006).

China e Rússia (Sloan, 2008; Adamsky, 2010; Zysk, 2021). Ao contrário da RMA, que normalmente é associada a alterações já consolidadas, a transformação militar tem caráter normativo e prospectivo, sendo compreendida como um esforço deliberado de adaptação das forças armadas a um ambiente estratégico em mudança (Krepinevich, 2023).

Segundo Sloan (2008), o conceito de transformação militar buscou institucionalizar a ligação entre tecnologia, doutrina e organização, tentando oferecer uma diretriz política para a modernização das forças armadas frente às ameaças emergentes do pós-Guerra Fria. Sendo assim, a transformação militar começa a compreender desde então que o desenvolvimento tecnológico *per se* não é suficiente para redefinir a conduta militar, sendo necessário um processo de adaptação organizacional e conceitual mais amplo (Sloan, 2008; Zweibelson, 2023).

1.2 Inovação militar e modelo de Horowitz e Pindyck (2023)

A busca por superar a ótica determinista da RMA e suas derivações contribuiu para um deslocamento gradual do debate em direção a abordagens mais processuais da inovação militar. Em vez de conceber a mudança como um evento revolucionário concentrado no tempo, parte da literatura passou a enfatizar a inovação como um processo contínuo, marcado por interações entre tecnologia, organização, doutrina e contexto estratégico (Grissom, 2006; Farrell; Terriff; Osinga, 2014; Berthelsen, 2025). Nessa perspectiva, a inovação não se confunde com a mera introdução de novos sistemas, mas envolve transformações sustentadas na forma como as forças armadas concebem, organizam e empregam suas capacidades.

Conforme Griffin (2016), os estudos sobre inovação militar têm um caráter multidisciplinar, mas acabam por carecer de integração teórica. Por exemplo, Cheung (2021, p. 776) define inovação em defesa como a “transformação de ideias e conhecimento em novos ou melhorados produtos, processos e serviços para aplicações militares e de uso dual”. Em contraste, Krepinevich (1994; 2023) argumenta que inovações militares podem resultar a partir de avanços tecnológicos, mas associadas a novas táticas e modelos organizacionais e, quando atingem uma escala ampla, produzem revolução militar. A perspectiva apresentada por Krepinevich aponta que nem toda inovação resulta em revolução, mas toda revolução depende da consolidação de inovações que alteram o custo-benefício da guerra (Krepinevich, 2023).

Esse deslocamento teórico-analítico, que afasta o debate da centralidade das RMA e o reorienta para abordagens processuais da inovação militar, é particularmente relevante para a análise de conflitos contemporâneos, nos quais coexistem elementos de continuidade e

mudança (Fedorchak, 2024; Rogers, 2024). Logo, ao reconhecer os limites explicativos das RMAs e do determinismo tecnológico, a literatura abre espaço para abordagens que permitem analisar inovações emergentes em níveis tático-operacionais, processos acelerados de aprendizagem em guerra e a incorporação de atores não tradicionais aos esforços militares. Ao mesmo tempo, preserva-se a necessidade de critérios analíticos rigorosos, evitando que qualquer mudança seja rotulada como inovação (Horowitz; Pindyck, 2023).

Dessa forma, o debate entre mudança militar, RMA e inovação estabelece as bases conceituais para a adoção de modelos analíticos mais graduais, sensíveis ao contexto empírico e capazes de distinguir entre adaptação contingente e transformação institucional. É nesse terreno que se insere a definição de inovação militar proposta por Horowitz e Pindyck (2023), que busca operacionalizar o conceito de forma a permitir sua avaliação empírica a partir de quando e em que medida determinados fenômenos configuram processos de inovação militar.

Outrossim, diante das limitações conceituais associadas tanto às abordagens excessivamente amplas da mudança militar quanto às leituras deterministas vinculadas às Revoluções em Assuntos Militares, parte da literatura recente passou a buscar definições mais operacionalizáveis de inovação militar. Nesse esforço, destaca-se a contribuição de Michael Horowitz e Shira Pindyck (2023), que propõem uma definição capaz de diferenciar inovação de adaptação contingente, bem como se capturar variações na intensidade e no efeito das mudanças observadas nas práticas militares.

Assim, entendemos que a discussão sobre inovação militar é inseparável da análise do emprego de drones dentro do caso ucraniano. O presente trabalho adota a definição de inovação militar apresentada por Horowitz e Pindyck (2023), que compreendem o conceito como “mudanças na conduta da guerra projetadas para aumentar a capacidade de uma comunidade militar de gerar poder” (Horowitz; Pindyck, 2023, p. 99). Essa definição destaca uma maior funcionalidade da inovação: não se refere exclusivamente à adoção de novas tecnologias *per se*, mas modificar práticas operacionais e organizacionais de modo a potencializar o desempenho militar. Isto posto, o Quadro 1 sistematiza em formato sintético os conceitos fundamentais operacionalizados na seção anterior, no que concerne às diferenças entre mudança, revolução, transformação e inovação militar.

QUADRO 1 – Referencial teórico sintetizado

Conceito	Autor(es)	Definição
Mudança Militar	Knox e Murray (2001)	As formas de fazer a guerra mudam, envolvendo fatores tecnológicos, políticos e sociais.
Revolução em Assuntos Militares (RMA)	Krepinevich (1994; 2023); Sloan (2008)	Mudanças disruptivas no caráter da guerra permitindo saltos quânticos na efetividade.
Transformação Militar	Sloan (2008); Krepinevich (2023)	Esforço mais normativo e deliberado para adaptar forças armadas, institucionalizando a ligação entre tecnologia, doutrina e organização.
Inovação Militar	Rosen (1991)	Processo político e burocrático que altera o comportamento dentro das instituições militares.
Inovação Militar	Horowitz e Pindyck (2023)	Mudanças na conduta da guerra projetadas para aumentar a capacidade de uma comunidade militar de gerar poder.

Fonte: elaborado pela autora.

Ademais, um dos principais pontos da abordagem proposta por Horowitz e Pindyck (2023) reside na rejeição de concepções binárias de inovação. Em vez de tratar a inovação como um fenômeno que “ocorre” ou “não ocorre”, Horowitz e Pindyck (2023) propõem um modelo processual que possibilita a inferência de uma escala graduada, na qual diferentes processos de mudança podem ser posicionados de acordo com sua intensidade, abrangência e grau de institucionalização. Esta especificidade do modelo ilumina o presente estudo, como demonstrado na estruturação das hipóteses. Essa perspectiva permite analisar empiricamente casos nos quais coexistem elementos de continuidade e transformação, evitando classificações binárias.

No modelo desenvolvido pelos autores, a inovação militar é concebida como um processo composto por três etapas distintas, embora interligadas: invenção, incubação e implementação. A fase de invenção refere-se ao surgimento inicial de novas ideias, tecnologias ou práticas, que podem emergir tanto de iniciativas formais quanto de experimentações informais no nível tático-operacional. Importante destacar que, nessa etapa, a existência de uma nova capacidade não implica, por si só, inovação, uma vez que seu resultado ainda é limitado e incerto.

Sendo assim, a etapa de incubação corresponde ao período em que essas ideias ou práticas são testadas, adaptadas e refinadas, frequentemente em contextos operacionais

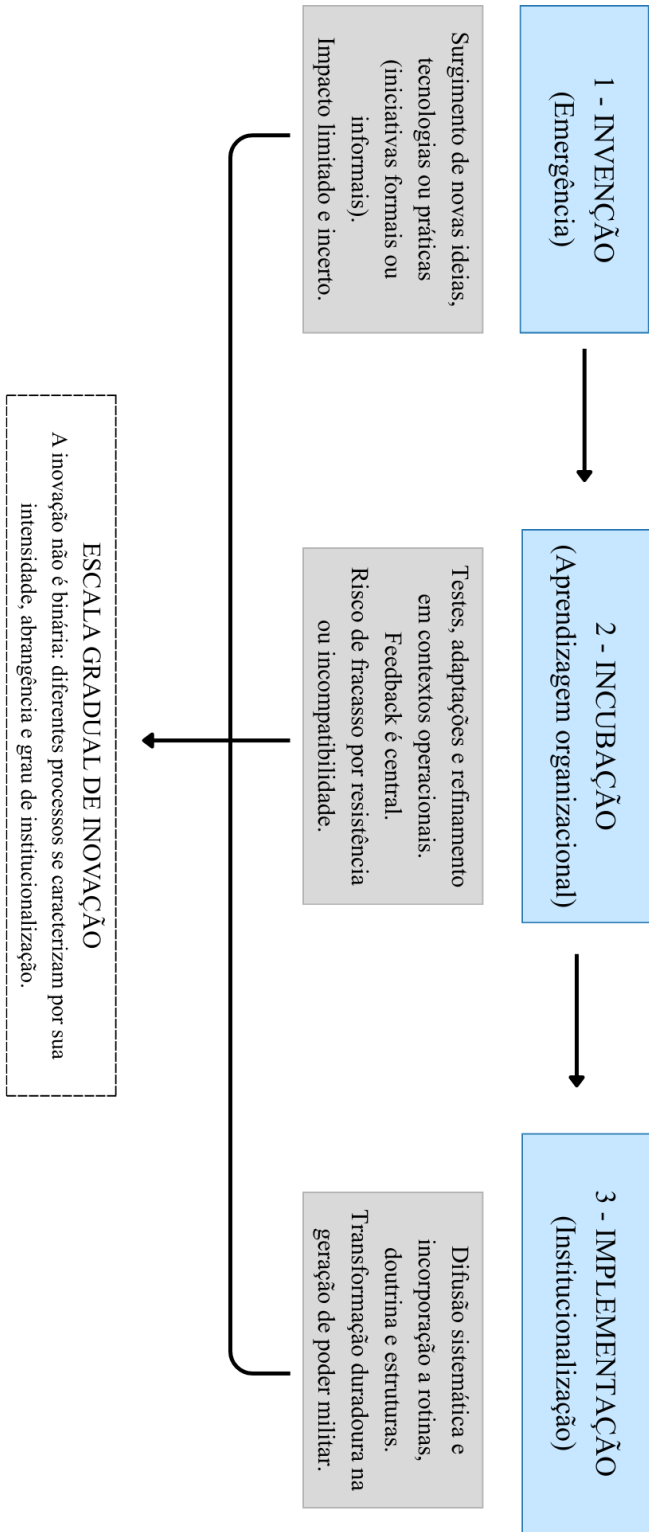
específicos. Durante a incubação, ocorre um processo de aprendizagem organizacional, no qual o *feedback*, proveniente de exercícios, experimentações ou o combate *per se*, desempenha papel central. Como observam Horowitz e Pindyck (2023), muitas iniciativas fracassam nessa fase, seja por limitações técnicas, resistência organizacional ou incompatibilidade com doutrinas existentes.

Por fim, a terceira etapa, de implementação, é aquela que distingue de forma mais clara a inovação da adaptação contingente. A implementação ocorre quando novas práticas ou capacidades são institucionalizadas, difundidas de maneira sistemática e incorporadas às rotinas organizacionais, à doutrina e às estruturas de comando. Nesse estágio, a inovação deixa de ser localizada ou experimental e passa a influenciar de forma consistente a maneira como a força militar é empregada (Horowitz; Pindyck, 2023).

Para fins analíticos, considera-se que a fase de implementação atinge caráter completo quando três critérios cumulativos são satisfeitos: (i) institucionalização formal da capacidade em estruturas organizacionais permanentes; (ii) codificação doutrinária estabilizada e difundida em diferentes níveis de comando; e (iii) autonomia logística e industrial suficiente para sustentar a capacidade independentemente de improvisações contínuas ou dependência crítica de cadeias externas vulneráveis. A ausência de qualquer desses critérios indica implementação parcial ou incompleta. Essa definição busca conferir maior rigor à escala graduada adotada nesta pesquisa, distinguindo entre institucionalização emergente e consolidação estrutural, conforme os parâmetros propostos por Horowitz e Pindyck (2023).

De modo a ilustrar a materialização desses critérios, Horowitz e Pindyck (2023) oferecem o exemplo da consolidação da aviação embarcada pela Marinha dos Estados Unidos no período entreguerras. Diferente da mera adoção técnica de aeronaves, a inovação só atingiu maturidade estrutural quando satisfaz o trinômio da implementação: (i) no plano organizacional, houve a criação do *Bureau of Aeronautics* (1921), conferindo autonomia orçamentária e carreira própria aos aviadores navais; (ii) no plano doutrinário, os exercícios de frota (*Fleet Problems*) validaram a transição da função de reconhecimento para a de ataque, codificando táticas de task forces; e (iii) no plano industrial, o Estado assegurou o desenvolvimento de plataformas dedicadas e cadeias de suprimento autônomas. É esse nível de integração sistêmica que Horowitz e Pindyck utilizam para distinguir uma mudança estrutural na geração de poder militar de uma simples adaptação tecnológica.

FIGURA 1 – Modelo de Inovação Militar a partir de Horowitz e Pindyck (2023)



Fonte: elaborado pela autora a partir de Horowitz e Pindyck (2023).

Para além da dimensão processual, Horowitz e Pindyck (2023) enfatizam que a inovação militar deve ser avaliada com base em seus efeitos observáveis, particularmente no que se refere à alteração da balança de custo-benefício do emprego da força. Nesse sentido, uma inovação é considerada mais intensa quando permite gerar efeitos militares equivalentes ou superiores com menor custo relativo, seja em termos financeiros, humanos ou materiais, ou quando impõe custos desproporcionais ao adversário (Horowitz; Pindyck, 2023; Mittal; Goetz, 2025). Esse critério é especialmente relevante para a análise de conflitos contemporâneos, nos quais restrições orçamentárias e pressões políticas limitam o emprego de plataformas tradicionais de alto custo.

Outro elemento central da definição proposta pelos autores refere-se à distinção entre inovação tecnológica e inovação organizacional. Embora tecnologias desempenhem papel importante, Horowitz e Pindyck (2023) argumentam que inovações de maior efeito tendem a envolver transformações organizacionais e doutrinárias, que permitem explorar plenamente o potencial das capacidades materiais disponíveis. Tal ênfase dialoga diretamente com críticas anteriores ao determinismo tecnológico, reforçando a ideia de que a inovação emerge da interação entre tecnologia, organização e doutrina, e não de qualquer um desses elementos isoladamente (Watling, 2023).

A proposta de Horowitz e Pindyck também se destaca por sua atenção às condições facilitadoras e limitadoras da inovação. Os autores reconhecem que fatores como cultura organizacional, estruturas hierárquicas, incentivos institucionais e pressões externas influenciam decisivamente a trajetória dos processos inovadores. Assim, a inovação militar não é tratada como um resultado inevitável da introdução de novas tecnologias, mas como um fenômeno contingente, dependente de escolhas organizacionais e contextuais (Adamsky, 2010; Terhorst, 2025).

Portanto, ao permitir a identificação de graus variados de inovação e ao enfatizar critérios observáveis e sustentados, o modelo de Horowitz e Pindyck (2023) se mostra particularmente adequado para analisar contextos de guerra prolongada, nos quais adaptações rápidas coexistem com tentativas de institucionalização. Além disso, sua estrutura processual facilita a operacionalização de variáveis e a aplicação de métodos qualitativos, como a análise de congruência, ao possibilitar a comparação sistemática entre expectativas teórica e evidências empíricas.

Dessa forma, este trabalho adota a definição de inovação militar proposta por Horowitz e Pindyck (2023) como referencial central. A escolha se justifica tanto por sua clareza conceitual quanto por sua capacidade de diferenciar inovação de adaptação contingente,

permitindo avaliar em que medida determinados fenômenos configuram processos de inovação militar de baixa, média ou alta intensidade. Sendo assim, partimos da compreensão de que processos inovadores tendem a emergir da interação entre dimensões tecnológicas, organizacionais e doutrinárias, cuja combinação e grau de integração determinam tanto a intensidade quanto a sustentabilidade da inovação. Essa abordagem multidimensional permite superar leituras reducionistas que associam esse fenômeno exclusivamente à introdução de novos equipamentos ou sistemas.

A literatura sobre inovação militar converge amplamente quanto à necessidade de considerar essas três dimensões de forma articulada. Rosen (1991) já argumentava que inovações de maior efeito estratégico exigem não apenas novas tecnologias, mas também mudanças na estrutura organizacional e nas concepções de emprego da força. De modo semelhante, Farrell, Terriff e Osinga (2014) destacam que a inovação se consolida quando novas capacidades são incorporadas a práticas institucionais estáveis, capazes de moldar comportamentos, rotinas e expectativas no interior das organizações militares.

A dimensão tecnológica refere-se à introdução, modificação ou recombinação de meios militares existentes. Historicamente, transformações tecnológicas, como a mecanização, a aviação militar ou os sistemas de informação, desempenharam papel relevante na mudança das formas de combate. No entanto, a literatura contemporânea é cautelosa ao tratar a tecnologia como causa suficiente da inovação (Krepinevich, 2023; Horowitz; Pindyck, 2023).

Grissom (2006) observa que novas tecnologias frequentemente coexistem, por longos períodos, com práticas tradicionais, produzindo efeitos limitados quando não são acompanhadas por mudanças organizacionais e doutrinárias. Nesse sentido, a dimensão tecnológica deve ser compreendida como condição necessária, mas não suficiente, para a inovação militar. A simples disponibilidade de um novo sistema não implica, automaticamente, alteração significativa na forma como o poder militar é empregado.

Horowitz e Pindyck (2023) reforçam esse argumento ao destacar que tecnologias inovadoras podem permanecer subutilizadas ou ser empregadas de maneira marginal caso não sejam integradas a estruturas institucionais capazes de explorá-las plenamente. Assim, do ponto de vista analítico, a dimensão tecnológica da inovação deve ser avaliada não apenas pela novidade do artefato, mas por sua difusão, escala de emprego e efeito mensurável sobre a eficácia operacional (Niederkofler, 2025).

Isto posto, a dimensão tecnológica envolve elementos como: a proliferação de novas plataformas ou sistemas; sua incorporação a diferentes níveis da força e sua capacidade de alterar a relação entre custo e efeito no emprego militar. Esses elementos permitem avaliar se a

tecnologia em questão permanece restrita a usos experimentais ou se passa a desempenhar papel central nas operações (Bronk; Watling, 2024).

Por sua vez, a dimensão organizacional diz respeito às transformações nas estruturas de comando, nos processos decisórios, nos arranjos institucionais e nas rotinas administrativas que permitem a incorporação sustentada de novas capacidades. A literatura enfatiza que organizações militares, devido à sua natureza hierárquica e burocrática, tendem a apresentar resistência significativas à mudança, especialmente quando esta desafia identidades profissionais e padrões consolidados de autoridade (Soeters *et al.*, 2006; King, 2011).

Rosen (1991) argumenta que inovações duradouras exigem mudanças na forma como as organizações militares distribuem responsabilidades, promovem lideranças e estruturam carreiras. Sem esse tipo de ajuste, novas capacidades tendem a ser absorvidas de maneira superficial, limitando seu potencial transformador. Nesse sentido, a inovação organizacional não se resume à criação de novas unidades ou departamentos, mas envolve alterações mais profundas nos incentivos e nas práticas institucionais (Bondar, 2024a).

Horowitz e Pindyck (2023) enfatizam que a institucionalização é um critério fundamental para distinguir inovação de adaptação contingente. A dimensão organizacional da inovação manifesta-se quando novas práticas deixam de depender de iniciativas individuais ou informais e passam a ser incorporadas a estruturas formais, regulamentos, procedimentos e cadeias de comando. Esse processo, então, indica que a mudança adquiriu caráter duradouro, tornando-se parte integrante da forma como a organização opera.

Empiricamente, a dimensão organizacional pode ser identificada por meio da criação ou reformulação de unidades dedicadas, da adaptação de estruturas de comando e controle, da alocação sistemática de recursos e da incorporação de novas funções a carreiras e especializações existentes. Bondar (2024a) aponta que elementos como esses sinalizam que a inovação ultrapassou o nível tático e passou a influenciar a organização como um todo.

Adicionalmente, a dimensão doutrinária concerne às mudanças nas concepções formais e informais que orientam o emprego da força militar. Doutrina, nesse sentido, não deve ser entendida apenas como documentos oficiais, mas como um conjunto mais amplo de ideias, princípios e expectativas compartilhadas que moldam a maneira como os militares concebem e conduzem operações (Farrell; Terriff; Osinga, 2014).

Mudanças doutrinárias são particularmente relevantes porque sinalizam uma reinterpretação do ambiente operacional e das formas consideradas legítimas e eficazes de empregar o poder militar. No entanto, a literatura destaca que alterações doutrinárias formais nem sempre se traduzem imediatamente em mudanças práticas. Em muitos casos, existe um

descompasso entre doutrina declarada e em uso, especialmente em contextos de guerra, nos quais práticas emergentes podem anteceder sua formalização (Adamsky, 2010; Slusher, 2025).

Horowitz e Pindyck (2023) reconhecem essa dinâmica ao tratar a doutrina como parte de um processo mais amplo de institucionalização. A inovação doutrinária ocorre quando novas práticas não apenas são reconhecidas, mas também legitimadas e difundidas como referências normativas para o emprego da força. Portanto, isso pode se manifestar tanto na atualização de documentos oficiais quanto na incorporação de novas concepções aos processos de treinamento, educação militar e planejamento operacional.

Sendo assim, a dimensão doutrinária envolve a codificação de novas práticas, a alteração de conceitos operacionais e a redefinição de prioridades estratégicas. Esses elementos indicam que a inovação passou a orientar expectativas e decisões de maneira sistemática, contribuindo para sua sustentabilidade ao longo do tempo.

Por conseguinte, um dos principais aportes da abordagem multidimensional da inovação militar reside na ênfase na integração entre as dimensões tecnológica, organizacional e doutrinária. A literatura converge quanto à ideia de que inovações de maior intensidade tendem a envolver transformações simultâneas nessas três esferas, enquanto mudanças restritas a uma única dimensão costumam produzir efeitos mais limitados e temporários (Rosen, 1991; Horowitz; Pindyck, 2023; Bronk; Watling, 2024).

Assim, a intensidade da inovação pode ser avaliada com base no grau em que essas dimensões se reforçam mutuamente. Processos nos quais novas tecnologias são acompanhadas por ajustes organizacionais e por mudanças doutrinárias coerentes tendem a produzir alterações mais profundas na forma como o poder militar é gerado e empregado. Por outro lado, a ausência de integração entre essas dimensões pode indicar que a mudança observada permanece no nível da adaptação contingente.

Essa perspectiva integrada fornece os critérios analíticos que orientam este trabalho. Ao examinar o emprego de drones aéreos, especialmente os drones FPV, no conflito russo-ucraniano, a análise buscará identificar em que medida as transformações tecnológicas foram acompanhadas por mudanças organizacionais e doutrinárias, e se essas mudanças produziram efeitos sustentados e mensuráveis. Esses critérios servirão de base para a aplicação da análise de congruência no Capítulo 3, permitindo avaliar o grau de inovação militar associado ao caso estudado. Apresentamos a seguir a estratégia metodológica que guiou a operacionalização da pesquisa.

1.3 Metodologia, desenho de pesquisa e hipóteses

Por base metodológica, esta dissertação adota uma abordagem de enfoque qualitativo, orientada pela necessidade de compreender processos complexos, dinâmicos e contextualmente situados, nos quais relações causais não podem ser adequadamente captadas por modelos estatísticos ou abordagens exclusivamente correlacionais (Sampieri; Collado, 2013). Nesse sentido, a pesquisa qualitativa se apresenta como adequada para o estudo de fenômenos como a inovação militar, uma vez que envolve interações entre tecnologia, organização e doutrina, cujos efeitos se manifestam de forma gradual e frequentemente não linear (Sampieri; Collado, 2013).

Adicionalmente, o trabalho opta pelo estudo de caso único, conforme sistematizado por Van Evera (1997) e por George e Bennett (2005), que apresenta capacidade de compreender mecanismos causais em profundidade e de lidar com fenômenos nos quais a variável temporal desempenha papel central. Conforme discutido neste capítulo, a inovação militar é compreendida como um processo, logo a escolha metodológica decorre da necessidade de analisar o desenvolvimento da variável dependente (V.D.) (grau de inovação militar) ao longo do tempo, uma vez que a variável temporal é central para a distinção entre adaptações táticas contingenciais e processos de inovação militar. Diferentemente de abordagens *Large-N*, o estudo de caso único possibilita examinar em profundidade como e sob quais condições determinadas práticas emergem, se consolidam ou permanecem limitadas.

Assim, Van Evera (1997) destaca que o estudo de caso é particularmente útil para: (a) identificar condições antecedentes; (b) testar explicações históricas plausíveis; e (c) analisar casos de importância intrínseca. Essas três funções são diretamente relevantes para os objetivos desta dissertação. Primeiramente, o estudo busca identificar as condições sob as quais o emprego tático-operacional de drones FPV pode evoluir de improvisações e adaptações pontuais para formas mais institucionalizadas de inovação militar. Em segundo lugar, a dissertação testa hipóteses concorrentes sobre mudança e inovação militar. E, por fim, o estudo do caso em questão apresenta relevância intrínseca, tanto em razão de seu contexto geopolítico, mas também em seu potencial de gerar inferências para o debate mais amplo sobre inovação militar.

O caso da Ucrânia foi selecionado por constituir um caso crítico para o estudo da inovação militar em contexto de guerra. Por se tratar de um conflito de alta intensidade e longa duração no século XXI, no qual um ator com restrições materiais, industriais e organizacionais enfrenta a Rússia, uma potência militar convencionalmente superior. Logo, esse contexto cria

incentivos à adaptação, experimentação e aprendizagem organizacional, tornando o caso interessante para investigar os limites e as possibilidades da inovação militar sob condições de escassez e pressão operacional contínua.

Dessa forma, a presente pesquisa se propõe a responder: Em que estágio do processo de inovação militar se encontra o emprego de drones aéreos *first-person-view* (FPV) pela Ucrânia? Não obstante, é importante destacar que a seleção do caso não pressupõe, a priori, que a Ucrânia tenha sucesso na inovação militar. Portanto o objetivo central é avaliar em que estágio o emprego tático-operacional de drones aéreos *first-person-view* (FPV) se encontra no modelo teórico adaptado a partir de Horowitz e Pindyck (2023). Assim, em busca de responder à pergunta de pesquisa, o trabalho está estruturado de acordo com os seguintes objetivos específicos: 1) Examinar o estado da arte sobre inovação militar; 2) Aplicar o modelo de Horowitz e Pindyck ao caso ucraniano, por meio de uma escala graduada de inovação; 3) Empregar o método da análise de congruência e; 4) Avaliar as condições e limitações da inovação ucraniana.

Por conseguinte, o trabalho busca superar uma visão dicotômica simplista entre “inova” e “não inova”, focando nas condições intervenientes que possibilitam, ou limitam, a transição entre improvisação, adaptação funcional e inovação militar. Essa perspectiva está em consonância com a definição graduada de inovação militar adotada nesta pesquisa, conforme modelo de Horowitz e Pindyck (2023).

Ademais, o desenho de pesquisa foi estruturado em torno do método de análise de congruência, conforme sistematizado por George e Bennett (2005). Esse método consiste na comparação sistemática entre os valores esperados de determinadas variáveis, derivados de hipóteses concorrentes, e os valores observados no caso empírico analisado (George; Bennet, 2005). Diferentemente de métodos comparativos entre múltiplos casos, a análise de congruência foca na coerência entre teoria e evidência empírica em um caso único.

Portanto, fazendo com que a força da inferência nesse método dependa do grau de correspondência entre as previsões teóricas e as observações empíricas. Logo, quanto maior o número de observáveis compatíveis com uma determinada hipótese, e quanto mais exigentes e específicos forem os observáveis, maior será o poder explicativo dessa hipótese em relação às alternativas concorrentes (Van Evera, 1997; George; Bennett, 2005).

Nesta dissertação, a análise de congruência permite avaliar qual das explicações teóricas concorrentes apresenta maior capacidade explicativa para o caso ucraniano: a) inovação militar de alta intensidade; b) adaptação tática contingencial e descentralizada; ou c) ausência de

inovação militar relevante. Essas três possibilidades refletem posições distintas presentes na literatura e evitam conclusões deterministas acerca do papel dos drones FPV no conflito.

Apesar do trabalho se posicionar como um estudo de caso único orientado ao caso (*case oriented*), buscou-se operacionalizar a pesquisa através de variáveis. Não obstante, a V.D. da pesquisa se caracteriza como o grau de inovação militar no emprego tático-operacional de drones FPV pela Ucrânia, podendo assumir valores de baixa, média ou alta intensidade. Essa operacionalização permite capturar variações no resultado e na institucionalização das mudanças observadas, em consonância com o modelo teórico adotado.

Os principais indicadores empíricos da variável dependente incluem (ver Quadro 2): 1) o grau de integração dos drones FPV em operações ofensivas regulares, missões de reconhecimento e atividades de correção de fogos de artilharia; 2) a alteração sistemática da balança de custo-benefício do emprego do poder militar; 3) a persistência e padronização do uso dessas plataformas ao longo tempo; e 4) a capacidade de gerar efeitos militares desproporcionais em relação ao custo do meio empregado.

Quadro 2 - Indicadores empíricos da variável dependente (grau de inovação militar)

Hipótese	Valor da V.D. (grau de inovação militar)	Indicadores empíricos observáveis da VD
H1 – Inovação militar de alta intensidade	Alto	(1) Alteração sistemática e sustentada da balança custo-benefício do emprego militar; (2) Geração de efeitos militares desproporcionais em relação ao baixo custo do meio (letalidade, neutralização, negação de área, pressão contínua); (3) Persistência e padronização do emprego dos drones FPV ao longo do tempo (2022-2025); (4) Escalabilidade do emprego e capacidade de reposição contínua; (5) Impacto relevante e recorrente na condução das operações.
H2 – Adaptação tática contingencial	Baixo a médio	(1) Ganhos predominantemente locais, temporários ou episódicos; (2) Impacto limitado ou instável na balança custo-benefício; (3) Dificuldade de padronização e escalonamento do emprego ao longo do tempo; (4) Dependência de janelas de oportunidade, improvisação ou condições específicas de escassez; (5) Efeitos militares relevantes apenas em contextos pontuais.
H0 – Ausência de inovação militar relevante	Irrelevante	(1) Nenhuma alteração identificável na balança custo-benefício do emprego militar; (2) Ausência de efeitos militares desproporcionais ao custo do meio; (3) Emprego marginal ou irrelevante para a condução das operações; (4) Falta de persistência temporal e de efeitos acumulativos; (5) Impacto operacional desprezível nos resultados observáveis do conflito.

Fonte: elaborado pela autora.

A seguir, a variável independente (V.I.) corresponde à forma de emprego dos drones FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia, definida como o conjunto de práticas tático-operacionais, organizacionais e doutrinárias associadas ao uso dessas plataformas no campo de batalha. Para fins de análise, essa variável é desagregada em três dimensões principais: integração doutrinária, integração organizacional e integração tático-operacional.

Destarte, a integração doutrinária se refere à presença dos drones FPV em manuais, diretrizes, documentos oficiais ou semi-oficiais, bem como à padronização das missões atribuídas. A integração organizacional diz respeito à criação de unidades específicas, à incorporação dessas capacidades em cadeiras de comando e ao treinamento sistemático e contínuo de operadores. Por fim, a integração tático-operacional envolve o uso recorrente dos drones FPV em operações combinadas, sua coordenação com artilharia, infantaria e sistema de ISR, bem como a adaptação dinâmica frente às contramedidas adversárias, com a guerra eletrônica e defesa aérea.

Com base nessa operacionalização, foram formuladas três hipóteses mutuamente exclusivas. A hipótese de pesquisa (H1) sustenta que o emprego dos drones FPV pela Ucrânia se localiza no estágio de inovação militar de alta intensidade, caracterizado pela integração doutrinária e organizacional dessas plataformas e por sua capacidade de alterar a balança de custo-benefício do conflito.

Adicionalmente, a hipótese alternativa (H2) propõe que as mudanças observadas correspondem a uma adaptação tática contingencial e descentralizada, impulsionada pela escassez de recursos e pela assimetria do conflito, sem evidências suficientes de institucionalização duradoura ou mudança estrutural de longo prazo.

Por fim, a hipótese nula (H0) assume que o emprego dos drones FPV emprego dos drones FPV não demonstra relevância no estágio de inovação militar, em razão de uma baixa integração doutrinária e organizacional, permanecendo como um fenômeno marginal em relação às estruturas centrais de geração de poder militar.

A análise do caso se baseia no recorte temporal entre fevereiro de 2022 e agosto de 2025, visto que ainda é um conflito em curso. Nesse sentido, buscou-se fontes documentais e bibliográficas correspondentes ao período que estejam disponíveis em inglês, português, ucraniano ou russo.

Dentro dessa classificação estão os documentos oficiais do governo ucraniano e outras organizações, como a OTAN; e fontes secundárias, a partir de relatórios de centros de pesquisa, *think thanks*, como o *Center for Strategic and International Studies* (CSIS) e o *Royal United*

Services Institute (RUSI), e publicações da literatura especializada, à exemplo de produções desenvolvidas por Dominika Kunertova, Viktoriya Fedorchak e Jack Watling.

Cabe destacar que parte significativa das evidências empíricas mobilizadas nesta pesquisa provém de relatórios produzidos por centros de pesquisa e *think tanks* especializados. Reconhece-se que tais documentos frequentemente apresentam interpretações analíticas próprias sobre o fenômeno estudado, o que pode gerar risco de circularidade inferencial caso suas conclusões sejam reproduzidas sem mediação crítica.

Para mitigar esse problema metodológico, esta dissertação distingue explicitamente entre: (i) dados factuais apresentados nos relatórios; (ii) interpretações propostas por seus autores; e (iii) a análise desenvolvida nesta pesquisa à luz do modelo teórico de Horowitz e Pindyck (2023). Sempre que possível, buscou-se triangulação entre diferentes fontes, incluindo documentos oficiais, literatura acadêmica revisada por pares e dados quantitativos, de modo a reforçar a robustez da análise de congruência (George; Bennett, 2005; Van Evera, 1997).

Dessa forma, os relatórios especializados são tratados como fontes secundárias interpretativas, e não como evidência conclusiva em si mesmas. Sempre que relatórios sustentam avaliações normativas ou conclusões interpretativas, estas são indicadas como pertencentes aos respectivos autores, sendo posteriormente submetidas ao teste de congruência à luz do modelo teórico adotado (George; Bennett, 2005; Van Evera, 1997). Dessa forma, evita-se a incorporação acrítica de interpretações externas e reduz-se o risco de circularidade inferencial.

Dessa forma, o critério fundamental de inclusão dos documentos e publicações é a abordagem ao uso de drones — especialmente os FPV — no conflito russo-ucraniano, inovação no campo militar, transformações operacionais no poder aéreo e os aspectos logísticos e financeiros associados ao emprego dos drones. Isto posto, a utilização de múltiplas fontes visa possibilitar a triangulação das evidências e reduzir vieses associados a narrativas isoladas, aumentando a robustez da inferência qualitativa (George; Bennett, 2005).

QUADRO 3 – Relação entre hipóteses, variáveis e observáveis para o teste de congruência

Hipóteses concorrentes	Variável dependente (VD)	Valor esperado da VD	Variável independente (VI)	Dimensão da VI	Observáveis empíricos para o teste de congruência (valores esperados)
H1 – O emprego de drones FPV se localiza no estágio de inovação militar de alta intensidade	Grau de inovação militar no emprego tático-operacional de drones FPV pela Ucrânia	Alto (inovação de alta intensidade)	Forma de emprego dos drones FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia	Integração doutrinária	(1) Presença recorrente e explícita de drones FPV em documentos oficiais/semi-oficiais (diretrizes, manuais, notas técnicas, orientações); (2) padronização de missões atribuídas aos FPV (ataque, reconhecimento, correção de fogos) e de procedimentos táticos; (3) evidências de incorporação do FPV a conceitos/rotinas de planejamento e emprego.
				Integração organizacional	(1) Existência de unidades, centros, estruturas ou funções formalizadas voltadas a drones/FPV; (2) cadeias de comando e controle definidas (quem demanda, quem coordena, quem executa) e mecanismos de coordenação interarmas; (3) treinamento sistemático e contínuo (programas, escolas, ciclos de qualificação), com padronização mínima.
				Integração tático-operacional	(1) Emprego recorrente de FPV em operações combinadas (infantaria, artilharia, ISR, não apenas episódico); (2) coordenação sistemática com correção de fogos e sensor-to-shooter; (3) evidências de adaptação rápida, mas acumulativa (TTPs) frente a contramedidas (guerra eletrônica, defesa aérea), com difusão interunidades.
				Efeitos observáveis (VD)	(1) Alteração sistemática e sustentada da balança custo-benefício (efeitos relevantes a baixo custo); (2) efeitos militares desproporcionais ao custo do meio (letalidade/neutralização/negação de área/pressão contínua); (3) persistência e padronização do uso ao longo do tempo (2022–2025), com escalabilidade e reposição.
H2 – O emprego de drones FPV constitui adaptação tática contingencial	Grau de inovação militar no emprego tático-operacional de drones FPV pela Ucrânia	Baixo a médio (ganhos táticos sem institucionalização duradoura)	Forma de emprego dos drones FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia	Integração doutrinária	(1) Ausência de padronização e/ou diretrizes formais consistentes; (2) presença apenas pontual em documentos (quando existente), com grande variação por unidade/região; (3) prevalência de improviso e soluções localizadas.
				Integração organizacional	(1) Estruturas informais, paralelas ou temporárias; (2) dependência elevada de voluntários, redes civis ou iniciativas locais; (3) treinamento irregular, por “aprender fazendo” e por socialização em combate; (4) fragilidade de coordenação hierárquica e de rotinas institucionais.
				Integração tático-operacional	(1) Uso pontual de FPV, concentrado em situações específicas; (2) coordenação interarmas irregular (quando ocorre, é pontual); (3) adaptação reativa a contramedidas sem difusão institucional estável (práticas “não viram regra”).
				Efeitos observáveis (VD)	(1) Ganhos predominantemente locais e temporários; (2) impacto limitado e/ou instável na balança custo-benefício; (3) dificuldade de escalar e padronizar o emprego ao longo do tempo; (4) dependência de condições de escassez e de janelas de oportunidade.
H0 – O emprego de drones FPV não demonstra relevância no estágio de inovação militar	Grau de inovação militar no emprego tático-operacional de drones FPV pela Ucrânia	Irrelevante (sem inovação militar)	Forma de emprego dos drones FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia	Integração doutrinária	(1) Inexistência de referências em documentos oficiais/semi-oficiais; (2) ausência de padronização de missões e procedimentos; (3) inexistência de orientações ou conceitos operacionais sobre FPV.
				Integração organizacional	(1) Ausência de unidades/funções/rotinas dedicadas; (2) emprego residual e marginal sem inserção em cadeias de comando; (3) ausência de treinamento institucionalizado.
				Integração tático-operacional	(1) Uso experimental ou esporádico sem recorrência; (2) baixa coordenação com outros meios; (3) ausência de aprendizado acumulativo e de difusão interunidades.
				Efeitos observáveis (VD)	(1) Nenhuma alteração identificável na balança custo-benefício; (2) ausência de efeitos desproporcionais ao custo; (3) emprego irrelevante para a condução das operações e para resultados observáveis.

Fonte: elaborado pela autora.

Por se tratar de um estudo de caso único, o presente trabalho não busca generalização estatística. Todavia, conforme argumentam George e Bennett (2005), estudos de caso podem contribuir para o refinamento teórico, ao testar a aplicabilidade de modelos analíticos e ao identificar condições sob as quais determinadas explicações são mais ou menos plausíveis. Assim, os resultados desta pesquisa devem ser compreendidos como contribuições analíticas, potencialmente informativas para outros contextos nacionais, mas sempre condicionadas às especificidades do caso analisado. Dessa forma, o desenho metodológico apresentado busca coerência interna entre teoria, método e evidência empírica, estabelecendo as bases para a análise desenvolvida nos capítulos seguintes.

2 OS DRONES NO CONTEXTO DA GUERRA RUSSO-UCRANIANA

No presente capítulo, apresentamos o caso ucraniano e o emprego dos drones, especialmente FPV. Na subseção 2.1 “Drones e poder aéreo: transformações contemporâneas” abordamos o processo de incorporação dos drones como vetor militar, e sua transformação de plataforma de vigilância até o momento como equipamento central na “democratização” do poder aéreo.

Na subseção 2.2 “A guerra russo-ucraniana e os drones aéreos”, abordamos o processo de adaptação e evolução que favoreceu o uso dos drones – principalmente dos drones de Classe 1 e 2 – pela Ucrânia, face à assimetria com a Rússia.

Na subseção 2.3 “O emprego dos drones pela Ucrânia e o papel do ecossistema ucraniano”, abordamos o objeto empírico da dissertação. Essa seção se propõe a apresentar a variável independente da pesquisa: o emprego de drones FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia, e seu contexto operacional no conflito. Para além disso, também tratamos do ecossistema sociotécnico ucraniano, que envolve as parcelas civil, militar e empresarial do país, de forma a sustentar o esforço de guerra.

2.1 Drones e poder aéreo: transformações contemporâneas

A incorporação de sistemas aéreos não tripulados ao repertório militar contemporâneo tem sido amplamente apontada pela literatura como um dos vetores mais relevantes de transformação do poder aéreo nas últimas décadas (Kreps, 2016; Fedorchak, 2020; Rogers, 2024). Diferentemente de ciclos anteriores de mudança tecnológica, associados à introdução de plataformas tripuladas de alto custo e elevada complexidade⁴, os drones aéreos emergem em um contexto marcado pela difusão tecnológica, pela redução de barreiras de entrada e pela crescente interpretação entre esferas civil e militar (Kreps, 2016; Kunertova, 2023b; Beaudoin *et al.*, 2023; Rogers, 2024).

Historicamente, o poder aéreo foi concebido como um domínio altamente especializado, dependente de plataformas sofisticadas, infraestrutura industrial avançada e pessoal altamente treinado. Essa configuração conferiu às grandes potências uma vantagem estrutural

⁴ Embora sejam sistemas não tripulados, os drones de Classe III (conforme classificação da OTAN, com peso máximo de decolagem superior a 600 kg) seguem a lógica industrial de alto custo e complexidade das plataformas tripuladas. Exemplos paradigmáticos incluem o *MQ-9 Reaper*. Estas plataformas exigem pistas de pouso convencionais, hangares, grandes equipes de manutenção e custam dezenas de milhões de dólares por unidade, situando-se no extremo oposto da filosofia de emprego de “massa descartável” e baixo custo dos drones FPV (Classe I) analisados nesta dissertação.

significativa, ao mesmo tempo em que limitou o acesso de atores com menores capacidades materiais (Olsen, 2010; Fedorchak, 2020; Fedorchak, 2024).

Diante das restrições estruturais, a proliferação dos drones passaram a ser interpretadas por parte da literatura como um elemento de desafio no emprego do poder aéreo (Hambling, 2015; Kreps, 2016; Rogers, 2024). Entretanto, longe de se caracterizar como uma ruptura, o processo de inserção desses equipamentos no rol de operações ocorreu de forma gradual e cumulativa, acompanhando transformações tecnológicas, organizacionais e operacionais (Fedorchak, 2020; Rogers, 2024). Nesse contexto, diversos autores passaram a propor periodizações que distinguíssem diferentes “eras” ou “fases” do emprego dos drones, de acordo com suas funções predominantes, nível de autonomia, peso e impactos sobre a condução das operações militares (Kreps, 2016; Gilli e Gilli, 2016; Scharre, 2018; Rogers, 2024).

Entretanto, o debate da literatura especializada sobre os critérios de periodização oscila entre abordagens focadas no desenvolvimento e maturidade tecnológica das plataformas, por outro lado, naquelas centradas na lógica de difusão e acesso (Kreps, 2016; Rogers, 2024). Rogers (2024) argumenta que a análise histórica é fundamental para compreender não apenas a evolução técnica, mas a mudança na natureza política do emprego dessas armas, que transita de uma lógica de projeção de poder unilateral para uma de contestação assimétrica. Por sua vez, Scharre (2018) sugere que o marco evolutivo central não reside na difusão dos vetores, mas na transição dos níveis de controle humano, deslocando o eixo de análise da posse para a autonomia decisória da máquina (*human-out-of-the-loop*). Por fim, Kreps (2016) argumenta que a relevância dessas eras deve ser compreendida sob a ótica da política doméstica e do Direito Internacional, onde a inovação principal reside na redução do custo político do uso da força, alterando parâmetros para a eclosão de conflitos.

Não há, portanto, um consenso sobre os marcos temporais exatos que separam o monopólio tecnológico da proliferação massiva, uma vez que tecnologias de diferentes gerações frequentemente coexistem nos mesmos teatros de operações. Por esta razão, as “eras” apresentadas no Quadro 4 não são compreendidas como categorias rígidas, mas como uma sistematização que auxilia no entendimento das tendências predominantes no emprego militar de drones.

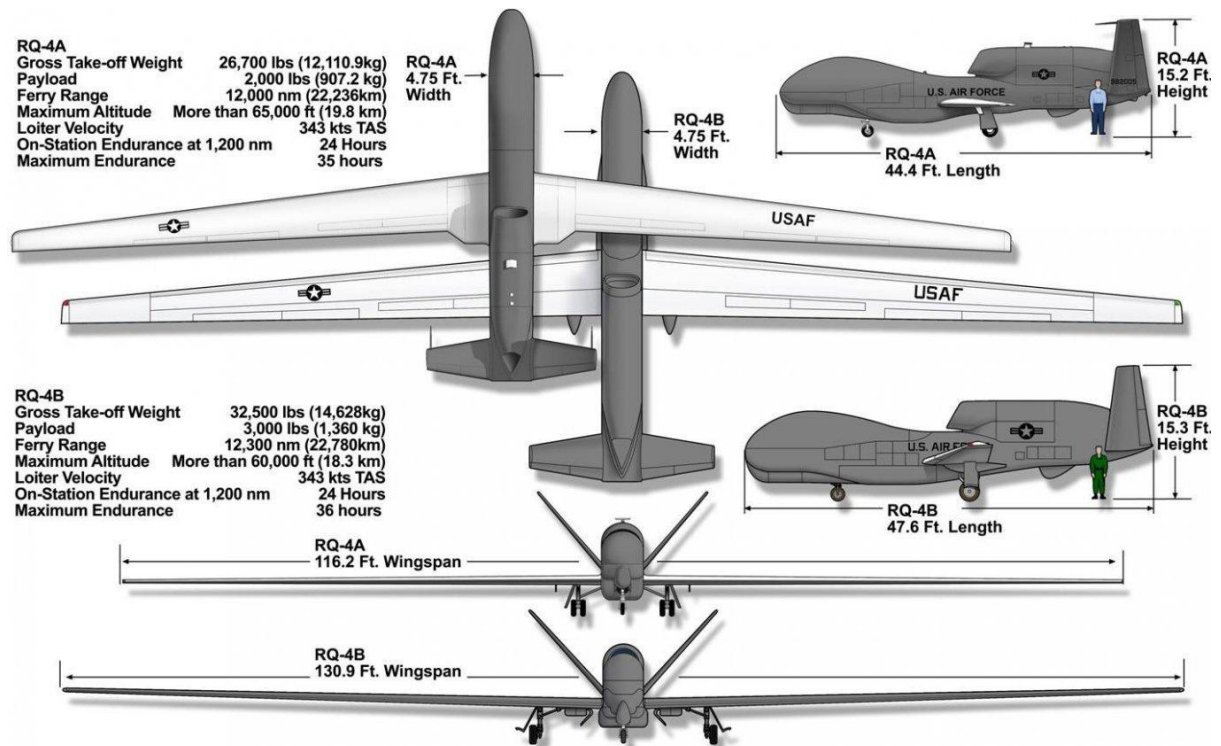
QUADRO 4 – Era dos Drones e características do emprego militar

Era dos Drones	Período	Características centrais	Emprego militar predominante	Nível de Emprego	Implicações para o poder aéreo
Primeira	Final da Guerra Fria - início dos anos 2000	Plataformas de grande porte; alto custo; desenvolvimento centralizado e estatal; forte dependência de complexos industriais de defesa; baixa difusão internacional	Vigilância estratégica persistente; ISR; ataques seletivos de alto valor	Estratégico/ Operacional	Reforça a centralidade das grandes potências e a lógica hierárquica e centralizada do poder aéreo
Segunda	Anos 2010 - presente	Miniaturização; barateamento; uso extensivo de componentes comerciais (COTS); rápida difusão civil-militar; ciclos curtos de adaptação e aprendizado	Vigilância tática; reconhecimento; correção de fogos; ataques de precisão de baixo custo (incluindo FPV)	Tático/ Operacional	Reduz barreiras de entrada ao poder aéreo e promove sua descentralização no campo de batalha
Terceira	Anos 2020 - presente	Integração em redes; emprego cooperativo (swarming); automação crescente; dependência de conectividade e dados; integração com IA	Saturação; desgaste; negação de área; sobrecarga de defesas aéreas	Tático/ Operacional/ Estratégico	Pressiona defesas aéreas tradicionais e altera a economia do combate aéreo e da guerra de atrito

Fonte: elaboração própria, com base em Hambling (2015), Kreps (2016) e Rogers (2024).

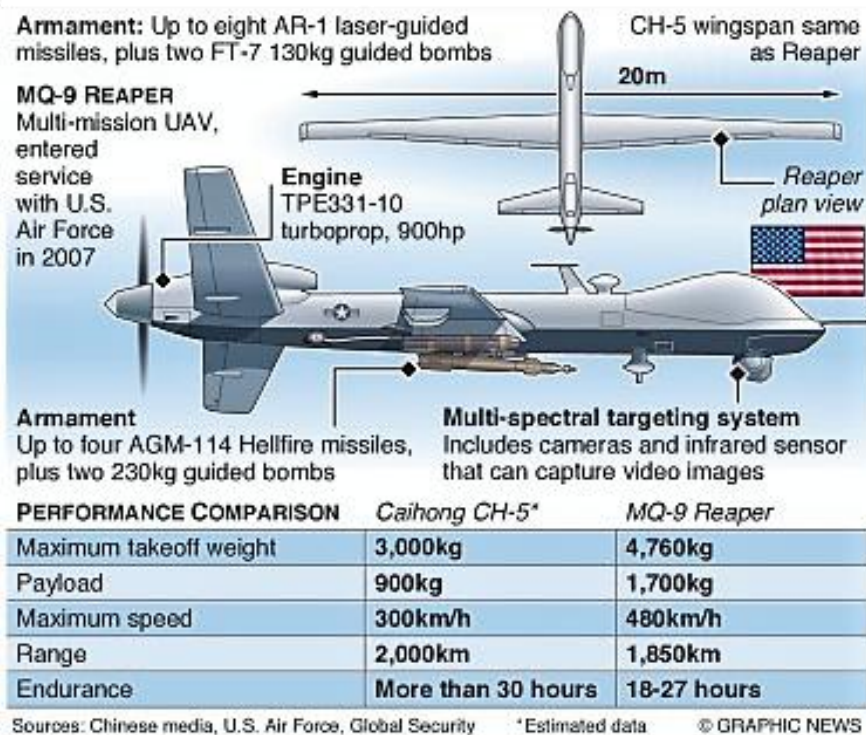
Inicialmente, com a Primeira Era de Drones, o emprego dessas plataformas esteve centrada na habilidade de distanciar as tropas estadunidenses e aliados do conflito direto na Guerra Global ao Terror, com a primazia de modelos como o *RQ-4 Global Hawk* e *MQ-9 Reaper* (Rogers, 2024).

FIGURA 2 – Dimensões do drone RQ-4 Global Hawk e variações



Fonte: Defense Express (2020).

FIGURA 3 – Dimensões do drone MQ-9 Reaper



Fonte: Graphic News (2015)

A proliferação de drones durante a Segunda Era de Drones, especialmente com os quadricópteros comerciais da série *DJI Mavic* (Classe 1) e o sistema tático Bayraktar TB2⁵ (Classe 2), desafia parcialmente esse arranjo ao introduzir capacidades aéreas com custos reduzidos e maior flexibilidade operacional (Rogers, 2024; Mittal; Goetz, 2025). Há uma discussão recorrente sobre a localização da atual era. Rogers (2024) assume, então, que estamos num processo de guinada da Segunda para a Terceira Era dos Drones, em que esta última apresentaria uma maior integração em redes, além de um aumento na automação.

No entanto, a literatura contemporânea destaca que os drones não devem ser compreendidos como substitutos de aeronaves tripuladas, mas como plataformas multifuncionais capazes de desempenhar uma ampla gama de missões, incluindo vigilância, reconhecimento, aquisição de alvos, ataque de precisão e apoio à coordenação de fogos (Hambling, 2015; Rogers, 2024; Fedorchak, 2024). Essa versatilidade amplia o escopo do poder aéreo, deslocando-o de um domínio restrito a forças aéreas profissionais para um conjunto mais amplo de atores e unidades operacionais.

Nesse sentido, Kreps (2016) argumenta que os drones contribuíram para uma reconfiguração gradual do poder aéreo, ao reduzir a centralidade do risco humano direto e permitir a persistência prolongada sobre o campo de batalha. A capacidade de manter plataformas aéreas em operação contínua, com custos operacionais relativamente baixos, altera a relação entre tempo, espaço e poder aéreo, favorecendo missões de vigilância e resposta rápida (Kreps, 2016; Kunertova, 2023a).

Além disso, autores como Kunertova (2023b), Fedorchak (2024) e Rogers (2024) destacam que a proliferação de drones está associada a uma mudança na economia política do poder aéreo. A disponibilidade de componentes comerciais (*commercial off-the-shelf* - COTS)⁶, cadeias de suprimento globalizadas e processos de produção descentralizados permitem que capacidades aéreas sejam desenvolvidas e adaptadas fora dos canais tradicionais da indústria de defesa (Niederkofler, 2025). Esse fenômeno, portanto, desafia modelos clássicos de

⁵ Embora seu peso máximo de decolagem (~650-700kg) o coloque na fronteira com a Classe 3, a literatura o trata como o ícone da “Segunda Era” por ser a plataforma que permitiu a potências médias (Azerbaijão, Ucrânia, Líbia) desafiarem exércitos convencionais a um custo acessível (Rogers, 2024).

⁶ O termo *commercial off-the-shelf* (COTS) refere-se ao uso de componentes e produtos originalmente destinados ao mercado civil (câmeras, baterias, sistemas de navegação, controladores, softwares, antenas), incorporados a soluções militares com menor custo e maior velocidade de reposição. A crescente dependência de cadeias comerciais e de produção descentralizada altera a economia política da aquisição e da manutenção de capacidades aéreas, reduzindo barreiras de entrada e ampliando possibilidades de adaptação em tempo de guerra (Kreps, 2016; Kunertova, 2023b; Rogers, 2024).

aquisição militar e reforça a importância de ecossistemas híbridos, nos quais atores civis e militares interagem de forma contínua (Beaudoin *et al.*, 2023; Rogers, 2024).

Do ponto de vista conceitual, a evolução do emprego de drones aéreos pode ser compreendida como um processo gradual, no qual missões inicialmente limitadas à vigilância e ao reconhecimento expandem-se para funções ofensivas e de coordenação operacional. A literatura aponta que esse aumento de possibilidade do emprego dos drones não ocorre de maneira automática, mas depende da integração desses equipamentos a sistemas mais amplos de comando, controle, comunicações, computadores, inteligência, vigilância e reconhecimento (C4ISR)⁷ (Watling; Reynolds, 2023; Bronk; Watling, 2024).

Nesse processo, os drones passam a atuar como multiplicadores de força, ampliando a eficácia de outros meios militares sem necessariamente substituí-los (Teixeira Júnior; Santos; Gomes, 2025). Hambling (2015) observa que, em vez de eliminar a necessidade de plataformas tradicionais, os drones frequentemente operam em complementaridade com sistemas existentes, contribuindo para ampliação da consciência situacional e para a redução de custos associados a missões de alto risco.

A classificação mais utilizada desses sistemas não-tripulados é baseada em três classes, de acordo com o peso, alcance e função (NOS, 2019).⁸ A Ucrânia adota a mesma divisão da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), detalhada no Quadro 3: a Classe 1 inclui drones leves e táticos, geralmente abaixo de 150 kg, subdivididos em pequenos, mini e micros; a Classe 2 envolve os drones de médio porte, entre 150 e 600 kg, com capacidade de operações de média duração e apoio tático-operacional; por fim, a Classe 3 compreende drones de grande porte, que tem uma variação entre *medium altitude long endurance* (MALE) e *high altitude long endurance* (HALE) (NOS, 2019).

⁷ C4ISR (*command, control, communications, computers, intelligence, surveillance and reconnaissance*) designa o conjunto de capacidades e processos que estruturam a integração entre comando e controle, comunicações, computação e funções de inteligência, vigilância e reconhecimento. No caso dos drones, a integração efetiva ao C4ISR condiciona sua utilidade operacional para além do emprego isolado, ao permitir ciclos mais rápidos de aquisição de alvos, coordenação de fogos e tomada de decisão, conectando sensores a “atiradores” (sensor-to-shooter) (Fedorchak, 2024; Rogers, 2024).

⁸ A classificação da OTAN tem finalidade normativa e interoperável, mas não explicativa do emprego real em guerra (2024).

QUADRO 5 – Classificação de *Uncrewed Aerial Systems* (UAS) da OTAN

Classe	Categoria	Emprego Normal	Altitude de Operação	Raio de Missão	Comando Suportado	Exemplo de Plataforma
Classe III (< 600 kg)	Ataque/Combate	Estratégico / Nacional	Até 65.000 pés (MSL)	Ilimitado (BLOS)	Comando de Teatro	Bayraktar TB2
	HALE	Estratégico / Nacional	Até 65.000 pés (MSL)	Ilimitado (BLOS)	Comando de Teatro	Global Hawk
	MALE	Operacional / Teatro	Até 45.000 pés (MSL)	Ilimitado (BLOS)	Força-Tarefa Conjunta (JTF)	PD-2, Heron
Classe II (150–600 kg)	Tático	Tático de Formação	Até 18.000 pés (AGL)	200 km (LOS)	Divisão, Brigada	Leleka-100, A1-CM Furia, Watchkeeper
Classe I (< 150 kg) ⁹	Pequeno (>15 kg)	Unidade Tática	Até 5.000 pés (AGL)	50 km (LOS)	Batalhão, Regimento	DJI Matrice 300, Punisher
	Mini (<15 kg)	Subunidade Tática (manual ou lanç. à mão)	Até 3.000 pés (AGL)	Até 25 km (LOS)	Companhia, Pelotão, Esquadra	DJI Mavic
	Micro (<66J)	Subunidade Tática (manual ou lanç. à mão)	Até 200 pés (AGL)	Até 5 km (LOS)	Pelotão, Esquadra	Drones FPV

Fonte: adaptado a partir de NOS (2019) e Rogers (2024).

Não obstante, é importante notar o risco em interpretar essa proliferação de drones como evidência automática de inovação militar profunda. Como argumenta Chamayou (2015), a adoção de drones pode reforçar práticas existentes de emprego do poder aéreo, como a vigilância e o ataque à distância, sem necessariamente alterar estruturas organizacionais ou concepções estratégicas mais amplas. Logo, essa observação, associada ao arcabouço teórico adotado ao longo desta dissertação, reforça a necessidade de distinguir entre mudança no meio e mudança na forma de fazer a guerra.

Seguindo essa perspectiva crítica, a literatura recente tem enfatizado que o potencial inovador dos drones depende menos de suas características técnicas isoladas e mais da maneira como são integrados a estruturas organizacionais e doutrinárias. Kunertova (2023a; 2023b) e Fedorchak (2024) sustentam que a transformação do poder aéreo associada aos drones ocorre quando essas plataformas são incorporadas de forma sistemática a processos decisórios, ciclos

⁹ Conforme classificação da OTAN (NATO, 2019), drones da categoria “Pequeno” (*Small*) situam-se acima da subcategoria “Mini” em termos de peso, alcance e capacidade operacional, ambos integrados à Classe I de *Uncrewed Aerial Systems* (UAS). Essa distinção é relevante para evitar inconsistências na tipologia adotada ao longo do trabalho.

de planejamento e práticas operacionais, produzindo efeitos sustentados na condução das operações.

Assim, os drones, em especial a categoria FPV, configuram um objeto interessante para o estudo da inovação militar, na medida em que concentram debates sobre tecnologia, organização e doutrina. Sua difusão acelerada, baixo custo relativo e versatilidade operacional permitem observar como as forças armadas experimentam, adaptam e, em alguns casos, institucionalizam novas formas de emprego do poder aéreo (Slusher, 2025). Contudo, como enfatiza a literatura, apenas uma parcela desses processos pode ser corretamente classificada como inovação militar no sentido estrito (Grissom, 2006; Horowitz; Pindyck, 2023).

Dessa forma, esta dissertação parte da definição e das dimensões analíticas discutidas nas seções anteriores para avaliar em que medida o emprego de drones aéreos FPV configura um processo de inovação militar. Essa avaliação será conduzida a partir do estudo de caso ucraniano, apresentado no capítulo seguinte no qual se examinará como drones foram empregados, integrados e institucionalizados no contexto da guerra russo-ucraniana iniciada em fevereiro de 2022.

2.2 A guerra russo-ucraniana e os drones aéreos

Em novembro de 2023, o então comandante-chefe das Forças Armadas da Ucrânia, Valerii Zaluzhnyi classificou a guerra russo-ucraniana – à época – como uma guerra moderna de caráter posicional, marcada pela dificuldade de romper a paridade militar com a Rússia, predominância de negação de área, saturação de fogos e intensa guerra eletrônica (Zaluzhnyi, 2023). Sob esta perspectiva, a prolongação do conflito tenderia a favorecer a Rússia, ao permitir a reorganização das capacidades militares e reorganização do aparato industrial, tornando necessária a constante busca por soluções tecnológicas e organizacionais.

Nessa perspectiva, a fim de evitar uma guerra de trincheiras prolongada, Zaluzhnyi (2023) destaca que os drones assumiram a vanguarda das operações, desempenhando funções críticas de reconhecimento e ataque que anteriormente cabiam à aviação tripulada, sendo essenciais para sobrecarregar as defesas aéreas inimigas. No entanto, ele argumenta que a assistência externa é insuficiente para sustentar a intensidade do consumo de munições e tecnologia, defendendo a autonomia produtiva. Como solução estrutural para a logística e inovação, o general afirmou ser necessário o “desenvolvimento e reforço das capacidades da indústria de defesa ucraniana; criação e desenvolvimento de um arsenal assimétrico de armas e equipamentos na Ucrânia; criação, produção e implantação de novas armas” (Zaluzhnyi, 2023,

p. 9). Logo, seguindo a lógica proposta por Zaluzhnyi, o emprego massivo de drones emerge não apenas como uma resposta tática à guerra posicional, mas como um dos principais vetores para afetar a balança de custo-benefício do conflito.

A guerra russo-ucraniana consolidou-se como um conflito de alta intensidade, caracterizado por “um elevado número de baixas, gastos maciços com material e movimentos limitados das linhas da frente” (Jones; McCabe, 2026, p. 2, tradução nossa).¹⁰ Dessa forma, reintroduzindo em âmbito europeu dinâmicas clássicas de guerra de atrito e desgaste, ao mesmo tempo em que acelerou tendências contemporâneas de adaptação tecnológica e de integração entre sensores, fogos e redes informacionais (Renic; Christensen, 2024; Fedorchak, 2024). Diferentemente de conflitos de menor intensidade no período imediato do pós-Guerra Fria, o caso ucraniano envolve a mobilização prolongada do máximo de contingente possível do país, ataques de longo alcance além de uma disputa constante pela superioridade informacional.

Nesse sentido, o caso em questão é particularmente relevante para o estudo da inovação militar porque combina três fatores estruturantes do ambiente operacional e organizacional: (a) pressão operacional contínua; (b) assimetria material e industrial entre os beligerantes; e (c) elevada plasticidade organizacional induzida pela necessidade de sobrevivência e de compensação de desvantagens (Kunertova, 2023a; Renic; Christensen, 2024; Fedorchak, 2024). Esses fatores moldam um ambiente no qual adaptações emergem rapidamente, mas nem sempre se consolidam, exigindo, assim, uma percepção sobre a temporalidade e a forma de institucionalização das mudanças.

No que se refere ao domínio aéreo, o conflito fornece uma janela empírica para observar os limites do poder aéreo contemporâneo no contexto caracterizado por um denso sistema de defesa antiaérea, guerra eletrônica e competição por superioridade de informações (Calcara *et al.*, 2022). A literatura sobre poder aéreo no pós-Guerra Fria enfatizou a centralidade da precisão, do ISR persistente e do *command and control* integrado como vetores de eficácia operacional (Haun; Jackson; Schultz, 2022). Contudo, a experiência ucraniana tensiona leituras excessivamente lineares sobre superioridade aérea como condição automática de vitória (Olsen, 2010; Fedorchak, 2024), especialmente no contexto de avaliações iluminadas pelo paradigma da OTAN (Valle, 2025). Em vez disso, o caso aponta para um ambiente em que o ar permanece altamente contestado e onde a eficácia do emprego aéreo depende tanto de

¹⁰ [...] high casualties, massive expenditures of matériel, and limited movement of front lines.” (Jones; McCabe, 2026, p. 2).

capacidades materiais quanto de arranjos organizacionais, dispersão, resiliência logística e adaptação contínua (DeVore, 2023; Kunertova, 2023a; Hoffman, 2021).

No início da invasão, a Ucrânia enfrentava limitações estruturais significativas no campo do poder aéreo, derivadas de fatores materiais, industriais e operacionais. Em termos gerais, tratava-se de uma força aérea com capacidades de aviação de combate inferiores às russas, dependente de plataformas herdadas da era soviética, com restrições de modernização e com menor profundidade logística para sustentar operações aéreas intensivas e prolongadas (Haun; Jackson; Schultz, 2022; Fedorchak, 2024) (ver Figura 4).

FIGURA 4 - Força militar antes da invasão da Rússia
Military strength before Russia's invasion

	Ukraine 	Russia 
Troops	1,096,600	2,900,000
Active 	196,600	900,000
Reserve* 	900,000	2,000,000
Main battle tanks 	987	3,417
Combat aircraft 	124	1,391
Attack helicopters 	57	407
Armoured personnel carriers 	831	7,272
Artillery 	1,818	5,899

*Note: reserve includes people who have had military service within 5 years

Source: Military Balance 2022



Fonte: BBC (2022).

Essa condição de assimetria se agravou pelo risco de ataques de precisão contra infraestrutura crítica — aeródromos, depósitos de munição, centros de comando e nós logísticos — que poderiam degradar rapidamente a capacidade de geração de surtidas (Krepinevich, 2023; Calcara *et al.*, 2022).

A vulnerabilidade das bases aéreas fixas ucranianas frente ao arsenal de mísseis balísticos *Iskander* e de cruzeiro *Kalibr* impôs, desde as primeiras horas da guerra, uma doutrina de sobrevivência baseada na mobilidade extrema de ativos de asa fixa e na descentralização de estoques de peças de reposição (Watling; Reynolds, 2023). Por sua vez, além das restrições materiais, o ambiente operacional inicial apresentava uma assimetria importante: a Rússia dispunha de superioridade quantitativa e qualitativa em meios de ataque à distância (mísseis de cruzeiro e balísticos, aeronaves de combate e sistemas de ISR), o que, em tese, permitiria uma campanha de supressão de defesas aéreas e antiaéreas e neutralização de alvos de alto valor (Zysk, 2021; Hoffmann, 2024).

Nesse sentido, essa superioridade era reforçada por uma densa rede de radares de longo alcance e sistema de defesa aérea, dentre os quais o S-400 que, operando a partir de território russo e da Crimeia, criaram uma zona de negação de acesso (A2/AD) que restringiu a liberdade de manobra da Força Aérea Ucraniana (UAF). O mapa a seguir (ver Figura 2) mostra o alcance das forças de A2/AD, que contribuem para negar o acesso militar a uma região e impedir a liberdade de manobra. A Rússia investiu energia considerável no desenvolvimento dessas capacidades, entretanto, a conversão de superioridade em controle efetivo do espaço aéreo depende de integração entre inteligência, capacidade de ataque e persistência operacional, especialmente quando o adversário dispõe de defesa antiaérea em camadas e de estratégias de dispersão para reduzir sua detectabilidade (Haun; Jackson; Schultz, 2022; Fedorchak, 2024; Mittal; Goetz, 2025).

Ou seja, a limitação inicial não se trata apenas da baixa disponibilidade de meios aéreos tradicionais (tripulados), mas um conjunto de restrições que tornam caro e arriscado usar sistemas tripulados em certas condições, abrindo espaço para soluções autônomas, de menor custo e maior tolerância a perdas (Scharre, 2018; Horowitz; Pindyck, 2023).

Outro ponto relevante é que o poder aéreo, entendido como capacidade de produzir efeitos militares a partir do domínio aéreo, não se reduz à aviação de combate, dependendo crucialmente da resiliência logística e do suporte (*enablement*) para sustentar o ritmo operacional em alta intensidade (Sollfrank; Boeke, 2024). E o próprio conceito de *enablement* no caso ucraniano expandiu-se para incluir a integração de infraestruturas civis, como a rede *Starlink* para comunicações resilientes e o uso de drones comerciais para a vigilância tática (Beaudoin *et al.*, 2023; Kreetz *et al.*, 2025).

A literatura sobre operações contemporâneas enfatiza a importância da articulação entre aviação, defesa antiaérea, ISR, guerra eletrônica e redes de comando e controle. Nesse sentido, mesmo uma força de aviação com severa limitação de meios tradicionais (tripulados) pode, ainda assim, influenciar o espaço aéreo por meio de negação e contestação, dificultando operações adversárias e elevando os custos da presença aérea inimiga (Olsen, 2010; Gruszczak; Kaempff, 2021). Esse ponto é importante porque o caso ucraniano não se limita à questão da escassez de meios para sustentar uma força aérea tradicional; mas trata-se de um contexto em que a contestação do domínio aéreo e a própria sobrevivência organizacional moldam diretamente a natureza, o ritmo e o escopo das adaptações subsequentes.

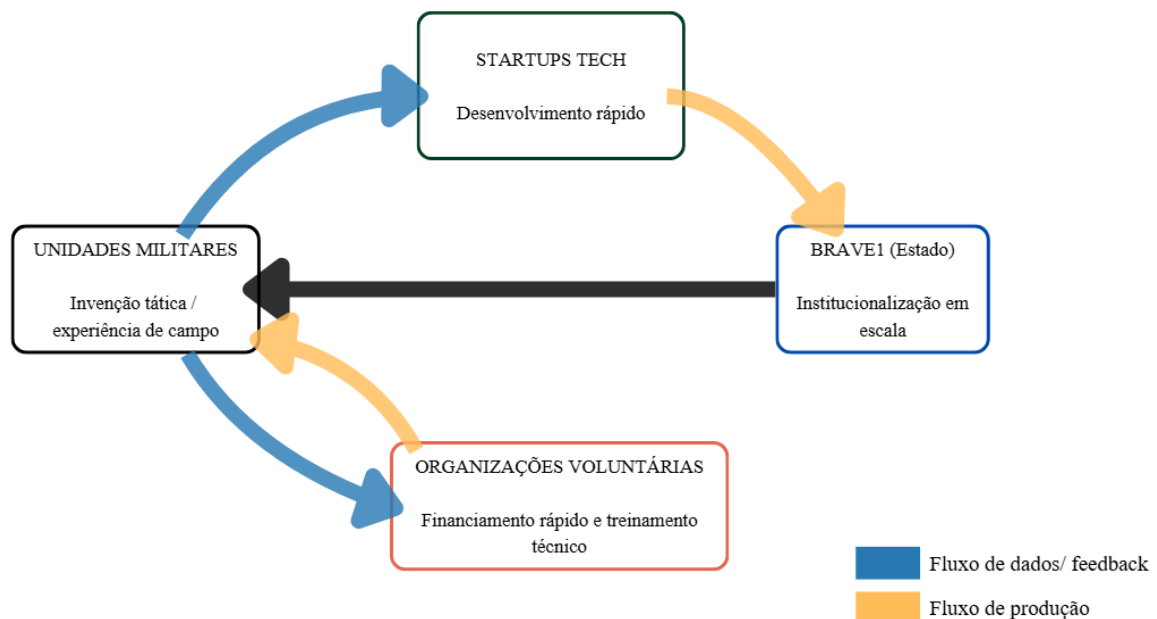
Diante dessas limitações iniciais, a partir do modelo de Horowitz e Pindyck (2023), a resposta ucraniana ao domínio material russo deve ser compreendida como um processo de adaptação sob restrição.¹² A literatura sobre mudança militar destaca que contextos de escassez, pressão operacional contínua e ameaça existencial tendem a acelerar ciclos de aprendizagem e experimentação, ainda que nem todas as adaptações resultantes se convertam em inovação duradoura (Hoffman, 2021; Grissom, 2006; Jones; McCabe; Palmer, 2023).

Para o caso ucraniano, essa premissa é central, pois situa a gênese do emprego massivo de drones não como uma escolha tecnocrática, mas como uma necessidade de sobrevivência imposto pelas condições materiais e operacionais do conflito (Kunertova, 2023a; Fedorchak,

¹² Compreendido nesta pesquisa como ação impulsionada pela necessidade de sobrevivência diante de assimetrias materiais críticas, e não por planejamento doutrinário prévio. Tal perspectiva é corroborada por Fedorchak (2024) e Renic e Christensen (2024), que demonstram como a escassez de plataformas convencionais e a pressão das contramedidas eletrônicas forçaram a Ucrânia a adotar soluções de baixo custo e integração civil-militar acelerada para superar o bloqueio operacional russo. Esses fatores serão mais explorados nas próximas seções.

2024). A escassez de munições de artilharia e a pressão operacional exercida pela massa blindada russa atuaram como catalisadores para a adoção, pela Ucrânia, de soluções de baixo custo e alto risco (Watling; Reynolds, 2023; Fedorchak, 2024). Nesse contexto, os drones FPV passam a desempenhar o papel de vetores de adaptação acelerada: em razão de sua arquitetura aberta e de sua elevada dependência de software, permitem ciclos de iteração tática significativamente mais rápidos do que aqueles associados às plataformas convencionais (Kunertova, 2023a; Allen, 2025; Renic; Christensen, 2024). Todavia, a literatura impõe uma ressalva central, que também estrutura o desafio analítico desta dissertação: distinguir se essa crescente dependência de drones configura apenas uma adaptação funcional transitória ou se, por meio de processos de institucionalização e formalização doutrinária — como a criação da *Unmanned Systems Forces* (USF) —, está se convertendo em uma inovação militar duradoura, a partir do modelo teórico de Horowitz e Pindyck (2023).

FIGURA 6 – Ecossistema de Inovação de Defesa da Ucrânia: ciclo de *feedback* e produção



Fonte: elaborado pela autora a partir de Kunertova (2023a), Ostafiichuck; Budden; Murray (2025).

Uma dimensão central dessa adaptação foi a priorização de capacidades que ampliassem a consciência situacional e reduzissem o tempo de resposta entre detecção e engajamento. A literatura sobre operações modernas enfatiza que a eficácia do combate contemporâneo depende crescentemente da integração entre sensores, sistemas de comando e meios de fogo, reduzindo o ciclo *sensor-to-shooter* (Hoffmann, 2024; Watling; Reynolds, 2023).

A Ucrânia implementou essa integração através de sistemas de gestão de batalha como o *Delta*,¹³ que funde dados de drones, imagens de satélite e inteligência de fontes abertas em uma imagem operacional comum (*Common Operational Picture*) acessível no nível tático (Beaudoin *et. al.*, 2023). Nesse contexto, plataformas capazes de operar como sensores persistentes e relativamente descartáveis adquirem valor estratégico crescente, mitigando o que Fox (2024) denomina como o “paradoxo da precisão”, onde a dependência excessiva de poucas munições de alto valor se torna uma vulnerabilidade (Fox, 2024).

A adaptação ucraniana também pode ser analisada à luz da relação entre logística, sustentação e poder de combate. Estudos comparativos sobre abordagens russas e da OTAN destacam que a capacidade de sustentar operações no tempo – incluindo reposição de meios, adaptação logística e flexibilidade organizacional – constitui fator crítico de sucesso militar (Sollfrank; Boeke, 2024). Sendo assim, a colaboração entre o governo e o parlamento para fomentar produtores domésticos de drones e robótica responde diretamente à soberania logística delineada por Zaluzhnyi (2023). Ou seja, ao buscar fechar o ciclo industrial internamente, essa articulação política visa mitigar a vulnerabilidade apontada pelo general quanto à insuficiência da ajuda externa, garantindo que a escala de produção nacional seja capaz de suportar a intensidade de consumo de munições e tecnologias exigida pelo front (MoD, 2024a).

Para a Ucrânia, a dificuldade de sustentar perdas em plataformas de alto custo reforçou a busca por meios mais baratos, rapidamente substituíveis e adaptáveis às condições do campo de batalha, embora isso gere novas dependências de cadeias de suprimentos de componentes de uso dual (Niederkofler, 2025). A dependência ucraniana de componentes comerciais (COTS), especialmente motores, baterias e microchips de origem chinesa, revela uma vulnerabilidade na soberania tecnológica, onde a escala de produção depende da estabilidade de cadeias de suprimento globais não-militares (Niederkofler, 2025; Ostafiichuck; Budden; Murray, 2025).

Nesse cenário, UAVs passaram a ocupar um espaço crescente no repertório operacional. A literatura sobre guerra com drones aponta que essas plataformas oferecem vantagens específicas em ambientes contestados: baixo custo relativo, tolerância a perdas, facilidade de adaptação e capacidade de operar em coordenação com outros meios (Hambling, 2015; Rogers; Hill, 2014; Sotoudhfar; Sarkin; Chaari, 2025).

¹³ Sistema de consciência situacional, apelidado de “Google Maps para os militares”. Ele fornece visualizações em tempo real do campo de batalha, integrando dados de diversas fontes, como reconhecimento aéreo, imagens de satélite e vídeos de drones, incluindo informações de parceiros da OTAN e informantes atrás das linhas russas. O sistema é usado por tropas militares, funcionários civis e observadores verificados para coletar, processar, exibir e compartilhar informações sobre as forças russas e coordenar as forças de defesa. Esses dados são incorporados em camadas na interface de batalha do *Delta*, mantida ativa e acessível aos usuários militares por meio das comunicações via satélite *Starlink* (Beaudoin *et al.*, 2023).

Entretanto, importante destacar que, embora eficazes, drones como os FPVs apresentam taxas de sucesso variáveis e não substituem totalmente a artilharia convencional, mas criam as condições materiais para uma assimetria de custos favorável ao defensor¹⁴ (Jajcay, 2025; Frantzman, 2021). Estudos de campo sugerem que, embora a taxa de acerto terminal dos FPVs seja frequentemente citada como baixa (aproximadamente entre 10 a 20% em ambientes de alta interferência), o efeito multiplicador de força reside na capacidade de saturar as defesas adversárias e negar a manobra blindada a um custo marginal ínfimo (Jajcay, 2025; Mittal; Goetz, 2025). Não obstante, com a introdução de drones FPV controlados por fibra ótica demonstrou um salto qualitativo, tornando esses equipamentos imunes aos sistemas de guerra eletrônica tradicionais e facilitando a eliminação de alvos protegidos por *jammers* (MoD, 2024e).

Outro aspecto relevante diz respeito à interação entre adaptação tática e estruturas organizacionais. A literatura sobre inovação militar enfatiza que adaptações emergentes em nível tático podem permanecer fragmentadas e temporárias ou, alternativamente, serem absorvidas e institucionalizadas pelas organizações militares, dependendo de fatores como cultura organizacional, incentivos e capacidade de coordenação (Terhorst, 2025; Horowitz; Pindyck, 2023).

Além disso, o caráter prolongado da guerra reforçou a centralidade da variável temporal na análise da mudança militar. Adaptações eficazes em um momento específico podem perder relevância à medida que o adversário desenvolve contramedidas, como intensificação da guerra eletrônica ou aprimoramento das defesas aéreas (Mittal; Goetz, 2025). A vida útil tática de uma nova frequência de rádio para drones FPV na Ucrânia é estimada em apenas algumas semanas, antes que as contramedidas de guerra eletrônica russas se adaptem, gerando um ciclo de “coevolução” tecnológica acelerado (Allen, 2025; Slusher, 2025).

Assim, apenas aquelas práticas capazes de se adaptar continuamente a ciclos tecnológicos curtos – ou seja, uma corrida entre *software* comercial e contramedidas militares – tendem a produzir efeitos sustentados (Allen, 2025; Watling; Reynolds, 2023). O engajamento da OTAN em conjunto com a Ucrânia para desenvolver contramedidas específicas contra drones de fibra ótica reforça a percepção de que a inovação militar ucraniana em ciclos rápidos de resposta (MoD, 2024d; Allen, 2025).

¹⁴ Situações em que os recursos necessários para manter uma posição defensiva são significativamente menores do que os custos impostos ao atacante para avançar. Essa dinâmica cria um desequilíbrio econômico e operacional, tornando a defesa mais sustentável e impondo ao atacante um desgaste contínuo e desproporcional (Jajcay, 2025).

Nesse sentido, a guerra russo-ucraniana evidencia que o poder aéreo contemporâneo não pode ser analisado exclusivamente a partir de plataformas tripuladas ou de campanhas aéreas clássicas. Em vez disso, ele se manifesta como um conjunto híbrido de capacidades, no qual sistemas não tripulados, fogos de longo alcance, defesa antiaérea, guerra eletrônica e redes informacionais interagem de maneira dinâmica (Fedorchak, 2024; Slusher, 2025).

Essa configuração amplia o espaço analítico para investigar como drones e, em particular, drones FPV passam a desempenhar funções antes inexistentes ou marginalizadas. A emergência de interceptores de drones (drones atacando outros drones) e o uso de sistemas de energia dirigida (DEWs) como resposta indicam que o domínio aéreo tático está sendo radicalmente redefinido pela autonomia e pela eletrificação do campo de batalha (Dee *et al.*, 2025; Slusher, 2025).

Até o momento, a literatura nos apresentou a Ucrânia como um caso de adaptação, tendo gerado inúmeras soluções, mas a questão central não é apenas se elas funcionam, mas se produzem mudanças duradouras na forma como o poder militar é gerado e empregado. É essa distinção que orienta a análise das seções subsequentes deste capítulo, nas quais se examina a evolução do emprego de drones pela Ucrânia e o papel do ecossistema sociotécnico que sustenta essas adaptações. O sucesso da Ucrânia em sustentar essa inovação dependerá, em última análise, de sua capacidade de transitar de uma adaptação emergencial descentralizada para uma base industrial de defesa consolidada e integrada aos padrões de interoperabilidade da OTAN (Muravska, 2022; Ostafiichuck; Budden; Murray, 2025).

2.3 O emprego dos drones pela Ucrânia e o papel do ecossistema ucraniano

O emprego de sistemas aéreos não tripulados pelas Forças Armadas da Ucrânia constitui um dos elementos mais visíveis, recorrentes e amplamente discutidos da guerra russo-ucraniana. Desde os primeiros meses do conflito, os drones passaram a desempenhar papel central em múltiplas funções no campo de batalha, transcendendo seu uso tradicional como plataformas de vigilância e reconhecimento para se tornarem vetores cinéticos diretos e instrumentos fundamentais de coordenação do combate.

Ainda assim, a evolução desse emprego não ocorreu de maneira abrupta nem mesmo linear, mas deve ser compreendida como um processo gradual e cumulativo, condicionado pelas restrições estruturais descritas na seção anterior, pela pressão operacional contínua imposta por

um conflito de alta intensidade e pela interação dinâmica entre adaptação tática e disponibilidade tecnológica (Hambling, 2015; Fedorchak, 2024; Watling, 2023).

No caso ucraniano, a institucionalização deste processo atingiu um novo patamar em fevereiro de 2024 com a criação da Força de Sistemas Não Tripulados (*Unmanned Systems Forces* - USF). Ao contrário de iniciativas fragmentadas, a USF foi estabelecida como um ramo independente das Forças Armadas da Ucrânia (ver Figura 7), visando padronizar o treinamento, o desenvolvimento tecnológico e a doutrina (Bondar, 2024a; MilitaryLand, 2024).

FIGURA 7 – Mapa das partes interessadas na IA militar na Ucrânia



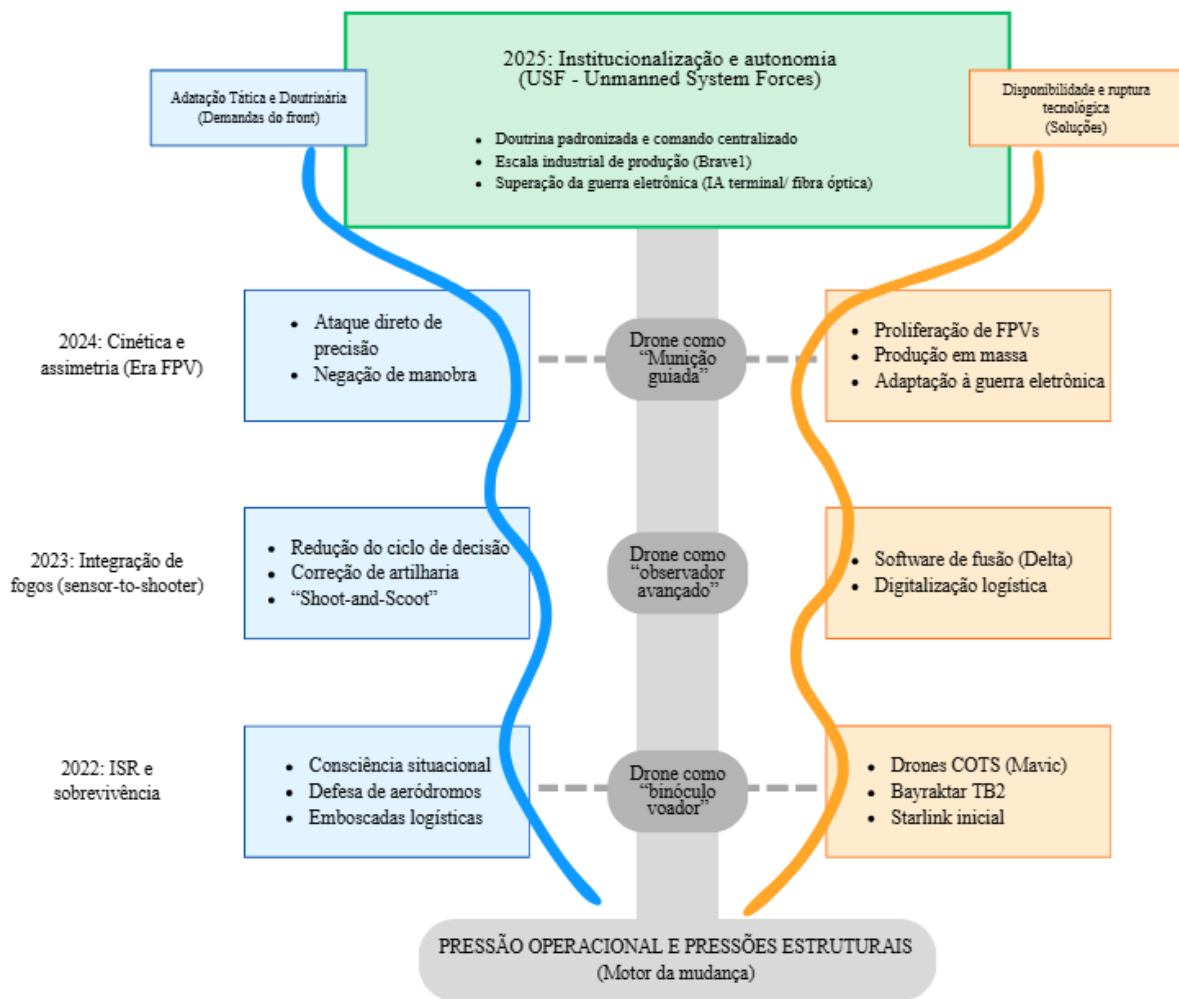
Source: CSIS analysis.

Fonte: Bondar (2024b).

Logo, essa ramificação das forças armadas ucranianas busca superar o *gap* entre protótipos e aquisição em escala, consolidando lições aprendidas em mais de 200 startups de drones em um sistema de força coerente (Bondar, 2024a; Darwish, 2025). Essa mudança estrutural demonstra a transição de uma fase de improvisação para uma escala industrial e

sinalização de um planejamento estratégico de longo prazo (Ostafiichuck; Budden; Murray, 2025). A figura a seguir (ver Figura 8) ilustra essa dinâmica por meio de uma “hélice de coevolução”, demonstrando como a interação contínua entre as demandas táticas do campo de batalha e as respostas tecnológicas disponíveis se entrelaçam e amadureceram ao longo do conflito, culminando na institucionalização de um novo ramo das Forças Armadas.

FIGURA 8 – Interação entre adaptação tática e ruptura tecnológica na Ucrânia (2022-2025)



Fonte: Elaborado pela autora, com base em Fedorchak (2024), Watling (2023), Bondar (2024a) e Darwish (2025).

Em conflitos contemporâneos caracterizados por elevada transparência do campo de batalha (Watling, 2023), a presença constante de sensores e a rapidez na circulação de informações tendem a reduzir significativamente a margem de manobra das forças militares (Fox, 2024). Nesse contexto, drones passaram a desempenhar papel central como ferramentas

de mitigação da incerteza operacional, permitindo que unidades no nível tático observassem, reagissem e ajustassem suas ações em tempo quase real (Watling, 2023). No caso ucraniano, essa dinâmica foi particularmente relevante em razão da necessidade de compensar desvantagens materiais e industriais frente a um adversário dotado de maior profundidade estratégica e maior capacidade de geração de poder aéreo convencional (Kunertova, 2023b; Fedorchak, 2024).

A resposta ucraniana a essa vulnerabilidade evoluiu da dispersão física para a digitalização da gestão de suprimentos; o lançamento do sistema *DOT-Chain* pelo Ministério da Defesa da Ucrânia exemplifica essa transição, ao reduzir a burocracia documental e acelerar a entrega de armamentos e munições às unidades de linha de frente, mitigando a paralisia logística causada por ataques a nós físicos (MoD, 2024c). Assim, o uso intensivo de drones não deve ser interpretado apenas como uma escolha tecnológica, mas como uma resposta organizacional e operacional a um ambiente altamente restritivo.

A literatura especializada enfatiza que o efeito operacional dessas plataformas não decorre apenas de suas características técnicas isoladas, como o *airframe*, a autonomia de voo ou a carga útil disponível, mas da forma como são constituídas enquanto complexos sociotécnicos (Bronk; Watling, 2024). Esses complexos integram sensores eletro-ópticos, estações de controle, *links* de comunicação, softwares de processamento de dados e operadores capacitados, ao mesmo tempo em que são incorporados às rotinas de comando e controle das unidades em combate (Bronk; Watling, 2024).

Como por exemplo, sistemas de fusão de dados baseados em IA, como o *Griselda*, exemplificam essa arquitetura ao unificar informações de satélites, drones e fontes de inteligência em uma imagem operacional comum (Darwish, 2025). Dessa forma, o drone deixa de ser um equipamento técnico isolado e passa a integrar uma arquitetura operacional mais ampla, cuja eficácia depende da qualidade da coordenação entre componentes técnicos, humanos e organizacionais. O caso ucraniano, nesse sentido, oferece um campo empírico privilegiado para observar como uma força em desvantagem material mobiliza drones de diferentes classes, desde plataformas comerciais adaptadas a sistemas militares dedicados, como forma de negar a liberdade de manobra ao adversário e reduzir sua vantagem convencional.

No estágio inicial do conflito, o emprego de drones pela Ucrânia concentrou-se majoritariamente em missões de ISR. Plataformas de Classe 2, como o *Bayraktar TB2*, e pequenos quadricópteros comerciais foram amplamente utilizados para monitorar movimentos inimigos, identificar concentrações de tropas e, sobretudo, acompanhar e interditar colunas

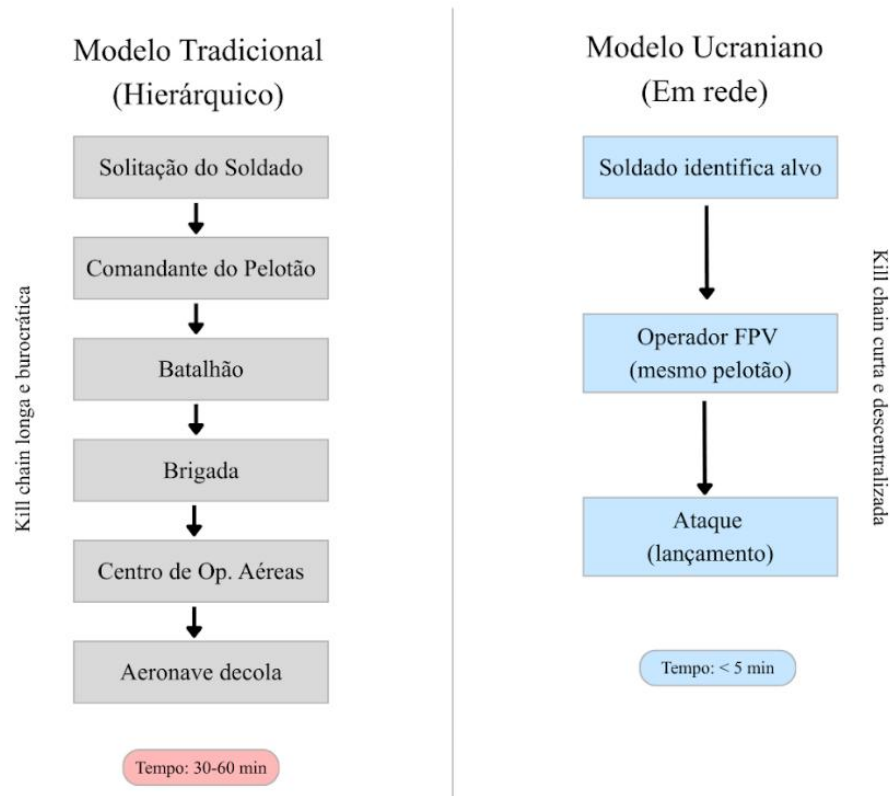
logísticas russas excessivamente estendidas e vulneráveis nos primeiros meses da ofensiva (Zabrodskyi *et al.*, 2022; Sanders *et al.*, 2023; Teixeira Júnior; Santos; Gomes, 2025). Esse emprego inicial permitiu à Ucrânia alcançar um nível de consciência situacional (*situational awareness*) sem precedentes no nível tático, reduzindo a incerteza operacional e ampliando a capacidade de resposta das unidades terrestres em um momento crítico do conflito.

Todavia, a eficácia dessas plataformas mostrou-se sensível à adaptação adversária. À medida que a Rússia reorganizou sua defesa aérea integrada e passou a empregar de forma mais sistemática capacidades de guerra eletrônica, a sobrevivência de drones MALE diminuiu consideravelmente. Como apontam Watling e Reynolds (2023), a presença de sistemas de defesa antiaérea em camadas, combinada com interferência eletromagnética persistente, reduziu drasticamente a liberdade de operação dessas plataformas em áreas contestadas.

Portanto, esse processo ilustra um padrão recorrente em conflitos modernos: soluções tecnológicas eficazes em um momento inicial tendem a perder parte de sua vantagem à medida que o adversário desenvolve contramedidas específicas. Watling (2023) destaca que a combinação entre sensores aéreos persistentes e artilharia de precisão constitui o principal mecanismo de geração de letalidade em um campo de batalha caracterizado por elevada transparência e rápida circulação de informações.

No caso ucraniano, a proliferação de drones táticos reduziu significativamente o ciclo *sensor-to-shooter*, permitindo que baterias de artilharia engajassem alvos com correções em tempo real. A integração de Ia no reconhecimento tático, através de sistemas como o *Saker Scout*, permitiu que drones identificassem alvos automaticamente, mitigando o erro humano e o efeito de interferências de sinal em áreas contestadas (Darwish, 2025). Essa redução do tempo entre detecção e engajamento produziu efeitos relevantes não apenas sobre a precisão dos fogos, mas também sobre a economia de munição e a sobrevivência das próprias unidades de artilharia (ver Figura 9).

FIGURA 9 – Comparativo de estruturas de comando e ciclo de decisão



Fonte: Elaborado pela autora com base na descrição dos sistemas *GIS Arta e Delta* em Beaudoin *et al.* (2023) e na análise da redução do ciclo *sensor-to-shooter* em Watling (2023).

Posteriormente, observou-se uma expansão significativa do emprego de drones em missões ofensivas diretas, impulsionada em grande parte pela escassez recorrente de munição de artilharia convencional enfrentada pela Ucrânia em diferentes fases do conflito. É nesse contexto que os drones FPV também ganham destaque estratégico. Diferentemente de plataformas de ataque reutilizáveis, os FPVs operam como munições guiadas de precisão descartáveis, pilotadas remotamente em tempo real, permitindo o engajamento direto de alvos de alto valor, como veículos blindados, peças de artilharia e sistemas de defesa aérea, a um custo marginal significativamente inferior ao de mísseis tradicionais (Watling; Reynolds, 2025).

Dessa forma, diante da escassez de apoio aéreo aproximado (*Close Air Support* - CAS), operadores ucranianos desenvolveram mecanismos de liberação impressos em 3D para soltar granadas antipessoal (VOG-17) e antitanque (RKG-3) através de drones diretamente sobre trincheiras e escotilhas abertas (Mittal; Goetz, 2025). DeVore (2023) destaca que, embora a carga útil fosse pequena, a precisão desse tipo de ataque permitia se não incapacitar veículos

blindados, mas atuar na desmoralização da infantaria adversária, reforçando o efeito psicológico do uso de drones (Watling, 2023; Mittal; Goetz, 2025).

FIGURA 10 – Granada VOG-17 modificada para ser lançada a partir de um drone



Fonte: Sania (2023)

FIGURA 11 – Granada RKG-3 modificada para ser lançada a partir de um drone



Fonte: Sania (2023)

Concomitantemente, do lado russo, de forma a contornar a guerra eletrônica russa, foram introduzidos os drones FPV controlados por fibra óptica ainda em 2024, que a posteriori foi incorporado pela Ucrânia (Kirichenko, 2025). A Rússia implantou sistemas de interferência

como o *Zhitel* e o *Pole-21*, capazes de cortar a conexão entre o operador e o drone ou falsificar sinais de GPS (*spoofing*). Dessa forma, o uso da fibra óptica elimina a dependência de rádio, tornando o drone imune a bloqueios de sinal e garantindo a destruição de alvos protegidos por *jammers* tradicionais (MoD, 2024d; 2024e). Além disso, o desenvolvimento de sistemas de IA terminal, como o *ZIR AI*, permite que o drone complete o ataque de forma autônoma caso o link com o operador seja rompido, utilizando visão computacional para travar no alvo final (Darwish, 2025).

A literatura recente aponta que, embora não substituam a massa de fogo proporcionada pela artilharia convencional, os drones FPV oferecem uma capacidade de ataque terminal guiado que altera de forma substantiva a relação custo-benefício do combate. Ao impor perdas materiais relevantes com meios de baixo custo, esses sistemas forçam o adversário a investir de maneira desproporcional em proteção física, dispersão de forças e contramedidas eletrônicas, elevando o custo marginal da defesa (Bronk; Watling, 2024; Mittal; Goetz, 2025).

Assim, os FPVs contribuem para uma lógica de desgaste assimétrico, particularmente favorável a forças que operam sob restrições materiais. Enquanto drones FPV dominam o espaço aéreo tático imediato devido ao baixo custo, facilidade de operação e rapidez de reposição; paralelamente, sistemas de asa fixa de maior alcance como o *AN-196 Liutyi* e o míssil-drone *Pallanytsia*, são empregados para ataques em profundidade, atingindo infraestruturas russas a centenas de quilômetros da linha de frente (Darwish, 2025).

Nessa perspectiva, um exemplo de articulação no uso de drones FPV ocorreu em 1 de junho de 2025, no aniversário de 101 anos da Aviação de Transporte Militar da Rússia, onde a Ucrânia realizou uma operação que objetivava atingir a capacidade aérea russa, denominada como Operação *Spiderweb*. Relatórios do *Center for Strategic and International Studies* (CSIS) apontam que a ação resultou no ataque em bases aéreas russas localizadas nas *oblasts*¹⁵ de Murmansk (a 1,900 km da Ucrânia), Ryazan (a 470 km), Ivanovo (a 700 km) e Irkutsk, à 4 mil km da Ucrânia, localizada no interior da Sibéria (Bondar, 2025) (ver Figura 12). A leitura inicial do episódio chamou atenção, pois tamanho ataque em profundidade nunca fora antes visto em território russo, nem mesmo durante os momentos de crise durante a Guerra Fria. Na ocasião, foi apontado que a Ucrânia obteve êxito usando drones no que em tese seriam necessários mísseis balísticos, no entanto, é importante ressaltar a dificuldade de certificar o real efeito da operação, principalmente por estar inserido num conflito ainda em andamento.

¹⁵ Unidade administrativa de nível regional nos países da antiga União Soviética, equivalente a uma província ou estado.

Em suma, a cobertura ocidental do episódio descreveu que cerca 116 drones aéreos pesando 3,5 kg e custando menos de 2 mil dólares por unidade foram capazes não somente de penetrar grande parte do território russo, como também de degradar aproximadamente 30% dos bombardeiros usados pela Rússia em sua campanha estratégica contra a Ucrânia (Bondar, 2025; Brown, 2025). Ainda que a efetividade real da operação possa ser questionada em termos quantitativos, o ataque também levantou novos receios sobre a escalada nuclear no conflito, uma vez que os bombardeiros Tupolev, além de poder carregar bombas convencionais também fazem parte da tríade nuclear russa, ensejando o risco de uma retaliação nuclear (Bondar, 2025; Brown, 2025).

FIGURA 12 – Bases aéreas russas atacadas durante operação com drones ucranianos



Fonte: Adaptado a partir de Bondar (2025).

Segundo análises feitas por especialistas vinculados a *think tanks* ao CSIS (Bondar, 2025), este episódio evidenciou de forma clara a tensão entre o emprego de capacidades militares tradicionais e estratégias de resistência baseadas no uso de meios mais acessíveis em contextos de assimetria. É importante observar que essa assimetria é construída a partir da relação entre a capacidade russa em investir na sua produção militar em escala (muitas vezes em detrimento do aspecto qualitativo), logo, a Ucrânia, mesmo recebendo ajuda internacional, não consegue contrapor essas capacidades no campo de batalha, conforme ilustrado no Quadro 6 (Renic; Christensen, 2024).

QUADRO 6 - Ajuda militar enviada à Ucrânia entre 24 de janeiro de 2022 e fevereiro de 2025

País	Valor da ajuda militar em dólares	Tanques	Veículos de combate de infantaria	Obuses	Sistemas de foguetes	Sistemas de defesa aérea
Estados Unidos	\$70 bilhões	76	305	201	41	18
Alemanha	\$14 bilhões	60	174	110	8	27
Reino Unido	\$11 bilhões	14	0	94	6	0
Dinamarca	\$8 bilhões	94	100	42	0	0
Países Baixos	\$7 bilhões	104	294	23	0	0
Suécia	\$6 bilhões	10	70	0	0	0
França	\$4 bilhões	0	0	69	4	2
Polônia	\$4 bilhões	354	42	18	0	0
Canadá	\$3 bilhões	8	0	4	0	1
Noruega	\$2 bilhões	8	0	27	11	0
Itália	\$1 bilhão	0	0	76	2	2
República Checa	\$1 bilhão	72	131	13	12	16
Austrália	\$920 milhões	49	0	6	0	0
Espanha	\$840 milhões	29	0	0	0	8
Estônia	\$800 milhões	0	0	24	0	0
Eslováquia	\$740 milhões	0	30	0	0	3

Fonte: adaptado pela autora a partir de Carlough e Harris (2025).

Por sua vez, a dependência intensiva da Ucrânia em tecnologias comerciais de uso dual, contudo, introduz desafios relevantes de segurança, resiliência e sustentabilidade. Como destacam Bronk e Watling (2024), o uso de plataformas comerciais implica a exposição a cadeias de suprimento globais, *softwares* proprietários e frequências de controle amplamente conhecidas, tornando esses sistemas particularmente vulneráveis à interferência e à exploração por parte do inimigo. Ainda assim, a capacidade de reposição rápida e a flexibilidade de adaptação compensam, em parte, essas vulnerabilidades, sobretudo em um contexto de atrito elevado. A criação da estrutura estatal *Brave1*¹⁶ visa mitigar essa dependência, acelerando a transição de protótipos civis para modelos de nível militar produzidos localmente.

A interação entre drones e guerra eletrônica tornou-se, portanto, um dos vetores determinantes da eficácia operacional no conflito. Estudos conduzidos pelo RUSI indicam que a vida útil média de um drone tático na linha de frente ucraniana pode ser medida em poucos voos, em razão da densidade e sofisticação das capacidades russas de interferência eletromagnética, que visam interromper enlaces de comando, navegação ou transmissão de dados (Zabrodskyi *et al.*, 2022; Watling; Reynolds, 2023). Essa realidade impôs à Ucrânia um ciclo de adaptação acelerado, marcado pela busca constante por novas frequências de operação, pelo desenvolvimento de soluções de navegação visual menos dependentes de sinais de satélite e pela descentralização da produção e modificação de drones.

A utilização de drones pela Ucrânia para além de reforçar a sustentação da força, também teve um impacto psicológico nas forças russas (Rosa, Silva, e Ribeiro 2024). Segundo Fedorchak (2024), a presença constante de drones no campo de batalha cria um ambiente de vigilância contínua, no qual as forças inimigas estão constantemente sob ameaça de ataques aéreos. Esse efeito psicológico pode desmoralizar as tropas inimigas e reduzir sua eficácia de combate.

Nesse sentido, o emprego de drones pela Ucrânia evoluiu de um suporte predominantemente voltado à vigilância para um componente integral do poder de combate, essencial tanto para a precisão e eficiência da artilharia quanto para a condução de ataques diretos por meio de drones FPV. Essa evolução não foi apenas tecnológica, mas profundamente organizacional, exigindo a criação de novas estruturas de força, como as USF, a adaptação de cadeias de comando e a revisão de doutrinas operacionais para atuar em um ambiente eletromagneticamente hostil e altamente transparente. A questão central para a análise da inovação militar, portanto, reside na capacidade dessas práticas de se institucionalizarem e

¹⁶ Será abordado mais adiante.

sustentarem sua eficácia ao longo do tempo, ultrapassando o estágio de improvisação inicial e consolidando-se como elementos duradouros da geração de poder militar (Horowitz; Pindyck, 2023).

A análise do emprego de drones aéreos pela Ucrânia não pode ser adequadamente compreendida sem considerar o ecossistema mais amplo no qual essas capacidades emergem, se adaptam e, em determinados casos, se institucionalizam. Diferentemente de modelos clássicos de inovação militar, frequentemente associados a processos centralizados, planejados e conduzidos por grandes organizações estatais em tempos de paz, o caso ucraniano evidencia um arranjo híbrido e dinâmico, no qual Estado, Forças Armadas, setor privado, redes de voluntários e sociedade civil interagem de forma contínua sob condições de guerra prolongada e alta intensidade (Hoffman, 2021; Kunertova, 2023a; Fedorchak, 2024).

A reorganização institucional foi fundamental para esse impulsionamento, e no caso ucraniano, isso se deu a partir do lançamento do programa *Army of Drones* ainda em 2022. Esse esforço integrou apoio governamental, com o Ministério da Defesa da Ucrânia (MoD), o Ministério da Transformação Digital, além de startups e *crowdfunding* (Kunertova, 2023a; Kunertova, 2024). Como meta, em nota divulgada pelo Primeiro Ministro ucraniano Denys Shmyhal (2024), o programa trabalhou com a previsão de entrega de 1 milhão de drones às linhas de frente até o fim do ano de 2025.

No caso ucraniano, esse arranjo encontrou sua máxima expressão na criação do *Brave1* e a seguir com o *Brave1 Dataroom*, o cluster de tecnologia de defesa da Ucrânia, lançado em 2023. O *Brave1*¹⁷ funciona como um ponto de entrada para startups, permitindo que soluções civis passem por testes mais rápidos e recebam subsídios estatais para produção em escala. Mais do que um facilitador de *hardware*, este ecossistema institucionalizou o fluxo de inovação, conectando mais de 200 fabricantes de drones diretamente aos comandantes de campo através de um *pipeline* de desenvolvimento que reduz o tempo entre o protótipo e o emprego tático para poucos meses (Bondar, 2024a; Ostafiichuck; Budden; Murray, 2025).

Esse ecossistema caracteriza-se por uma articulação fluida entre atores formais e informais, na qual as fronteiras tradicionais entre os âmbitos civil e militar tornam-se

¹⁷ *Brave1* é um cluster de inovação em defesa apoiado pelo governo ucraniano, criado para desenvolver soluções contra ataques de drones russos. Dentro desse programa, foi lançado o *Brave1 Dataroom*, um ambiente digital seguro que utiliza dados reais do campo de batalha para treinar modelos de inteligência artificial capazes de identificar, rastrear e interceptar drones inimigos. A plataforma, operando com software da empresa norte-americana Palantir, disponibiliza conjuntos estruturados de dados visuais e térmicos coletados na linha de frente, permitindo que engenheiros ucranianos desenvolvam algoritmos de defesa autônoma com menor necessidade de supervisão humana. O objetivo é acelerar a resposta contra ataques em larga escala e compartilhar futuramente essas capacidades com aliados internacionais.

progressivamente porosas. Tal configuração não é inteiramente inédita na história da guerra, mas adquire contornos específicos no contexto contemporâneo, marcado pela difusão de tecnologias de uso dual, pela centralidade do software, pela compressão dos ciclos de inovação e pela possibilidade de participação ampliada de atores não estatais na produção de capacidades militares (Farrell; Terriff; Osinga, 2014; Usachova, 2023; Horowitz; Pindyck, 2023).

Desde os primeiros meses da invasão em larga escala, observou-se uma mobilização significativa de voluntários, engenheiros, programadores e empreendedores em torno do desenvolvimento, adaptação e fornecimento de sistemas não tripulados, especialmente drones de pequeno porte e FPV. Inicialmente, muitas dessas iniciativas operam de forma paralela ou mesmo à margem das estruturas militares formais, com *crowdfunding*, doações privadas e redes diaspóricas. Usachova (2023) descreve esse fenômeno como uma forma de resistência participativa ou lúdica (*wargaming as resistance*), onde a sociedade civil se engaja diretamente no campo cibernético e na arrecadação de fundos para drones como uma extensão do esforço de guerra (Usachova, 2023; Kunertova, 2023; Slusher, 2025).

Nesse contexto, o papel do Estado ucraniano, foi ambivalente. Por um lado, houve uma postura relativamente permissiva em relação à experimentação descentralizada, tolerando soluções improvisadas e adaptações locais que, em contextos organizacionais mais rígidos, poderiam ser vistas como violações de procedimentos. Por outro, o Estado buscou progressivamente integrar essas iniciativas a canais formais, utilizando plataformas digitais como o sistema *Delta* para consolidar dados de inteligência *crowdsourced* e coordenar a ação de unidades dispersas (Beaudoin et al., 2023; Bondar, 2024a).

A criação da USF e a digitalização da cadeia de suprimentos pelo *Dot-Chain* sinalizam para essa institucionalização, no sentido proposto por Horowitz e Pindyck (2023): a transformação de práticas emergentes em capacidades sustentadas, integradas a estruturas formais de comando, treinamento e doutrina. Esse movimento sugere que, ao menos em parte, o emprego de drones – incluindo os FPV – deixou de ser apenas uma resposta contingente à escassez para se tornar um componente reconhecido da geração de poder militar ucraniano.

Outro elemento central do ecossistema ucraniano reside na proliferação do que a literatura tem denominado “laboratórios de guerra” – espaços físicos e virtuais nos quais tecnologias são testadas, adaptadas e refinadas em ciclos extremamente curtos, a partir do feedback direto do campo de batalha (Hoffman, 2021; Allen, 2025). Diferentemente de ambientes tradicionais de pesquisa e desenvolvimento militar, esses laboratórios operam sob condições de incerteza radical, com tolerância elevada a falhas e foco prioritário na eficácia imediata.

No caso dos drones FPV, esses laboratórios assumem formas diversas: oficinas improvisadas próximas à linha de frente, *hubs* tecnológicos em centros urbanos, redes *online* de compartilhamento de código, fóruns de operadores e comunidades de *makers*. A lógica que os sustenta é menos hierárquica e mais reticular, baseada na rápida disseminação de soluções funcionais, ainda que imperfeitas. Essa característica aproxima o ecossistema ucraniano de modelos de inovação aberta e numa relação intrínseca entre componentes comerciais e o campo de batalha, nos quais tecnologias civis e softwares de comerciais são rapidamente reaproveitados para fins militares (Beaudoin *et al.*, 2023; Griffin, 2016).

Esses laboratórios cumprem funções múltiplas. Em primeiro lugar, permitem a adaptação contínua dos sistemas às contramedidas russas, particularmente no domínio da guerra eletrônica. Mudanças em frequências, protocolos de comunicação, sistemas de navegação e software de controle são implementadas em ciclos de semanas ou mesmo dias. Em segundo lugar, esses espaços facilitam a recombinação de tecnologias existentes, integrando componentes comerciais e conectividade via *Starlink* a soluções militares improvisadas, reduzindo custos e acelerando a substituição de equipamentos perdidos (Bronk; Watling, 2024; Beaudoin *et al.*, 2023).

Contudo, a literatura alerta que esse tipo de inovação acelerada apresenta limitações importantes (Goncharuk, 2025). A dependência de componentes comerciais e cadeias de suprimento globais expõe o ecossistema a vulnerabilidades logísticas e geopolíticas, enquanto a ausência inicial de padronização pode gerar problemas de interoperabilidade e segurança operacional (Farrell; Terriff; Osinga, 2014; Horowitz; Pindyck, 2023). Além disso, embora a Ucrânia tenha atingido uma capacidade de fabricação massiva, a sustentabilidade industrial de longo prazo ainda depende da exportação de tecnologias de defesa excedentes e da integração com a base industrial de defesa europeia e da OTAN (Ostafiichuck; Budden; Murray, 2025; Niederkofler, 2025).

Talvez o aspecto mais relevante do ecossistema ucraniano para o debate sobre inovação militar seja a centralidade do *feedback* de campo como motor de aprendizado organizacional. Diferentemente de contextos nos quais o aprendizado ocorre predominantemente por meio de exercícios, simulações ou experimentações controladas, a guerra russo-ucraniana impõe um ambiente no qual o combate real fornece dados contínuos sobre eficácia, falhas e adaptações adversárias (Hoffman, 2021; Watling; Reynolds, 2023).

No emprego de drones FPV, esse feedback assume múltiplas formas e alimenta ajustes técnicos, mudanças táticas e, em alguns casos, revisões organizacionais mais amplas. Outro exemplo desse sistema de resposta rápida é o desenvolvimento de Veículos Terrestres Não

Tripulados (UGVs) como o *Lyut* e o *D-21-128* para combate e logística, ainda que não seja o objeto da presente dissertação, é mais uma amostra desse ciclo do ecossistema de inovação ucraniano, uma vez que foi observado a alta letalidade contra infantaria ucraniana em campo aberto (Darwish, 2025). A rapidez com que essas informações são incorporadas ao ciclo de adaptação constitui um diferencial significativo do caso ucraniano, reduzindo a defasagem entre experiência operacional e mudança prática (Allen, 2025).

Entretanto, permanece em aberto a questão da sustentabilidade desse aprendizado no longo prazo. Como apontam Horowitz e Pindyck (2023), a inovação militar só pode ser considerada de alta intensidade quando seus efeitos persistem para além do contexto específico que os gerou.¹⁸ O ecossistema ucraniano de drones evidencia que a inovação militar contemporânea não emerge exclusivamente de centros formais, mas da interação entre múltiplos níveis de ação e da articulação entre atores estatais e não estatais.

¹⁸ Tendo em vista a conjuntura do caso ucraniano, com o conflito em andamento, esse parâmetro de sustentabilidade é interpretado de forma limitada dentro do recorte temporal-analítico estabelecido.

3 OS DRONES FPV NA ESCALA DE INOVAÇÃO MILITAR UCRANIANA

No presente capítulo, apresentamos a análise e o teste das hipóteses da pesquisa, conectando a base teórica ao contexto operacional apresentado anteriormente. Enquanto o Capítulo 1 estabeleceu o marco teórico e o Capítulo 2 detalhou as variáveis independentes, este capítulo se dedica à análise de congruência, confrontando o que é previsto pelo modelo teórico e a realidade do conflito russo-ucraniano.

Na subseção 3.1, “Efeitos táticos e operacionais dos drones FPV: os drones como multiplicadores de força”, examinamos como a introdução massiva desses vetores alterou a balança de custo-benefício e a dinâmica tática do conflito, avaliando se tais efeitos configuram uma ruptura ou apenas uma adaptação funcional.

Ademais, na subseção 3.2 “Aplicação do modelo de Horowitz e Pindyck (2023) ao caso ucraniano: análise de congruência e das hipóteses”, aplicamos o método de análise de congruência para testar formalmente as hipóteses de trabalho (H1, H2 e H0). Nesta etapa final, confrontamos as expectativas teóricas de inovação de alta intensidade versus adaptação tática com as evidências coletadas, buscando responder à pergunta de pesquisa sobre a natureza da mudança militar em curso na Ucrânia.

3.1 Efeitos táticos e operacionais dos drones FPV: os drones como multiplicadores de força

A análise dos efeitos táticos e operacionais do emprego de drones FPV pela Ucrânia constitui um passo central para avaliar o grau de inovação militar associado a esse fenômeno. Conforme argumentado na seção anterior, a inovação militar, nos termos de Horowitz e Pindyck (2023), não se define apenas pela introdução de novos meios ou pela eficácia tática imediata, mas pela capacidade de produzir efeitos sustentados e mensuráveis na forma como o poder militar é gerado e empregado. Nesse sentido, os efeitos do emprego de drones FPV devem ser analisados não apenas no nível tático, mas também em sua capacidade de reconfigurar a economia do combate e de alterar concepções mais amplas sobre o poder aéreo no campo de batalha (Terhorst, 2025).

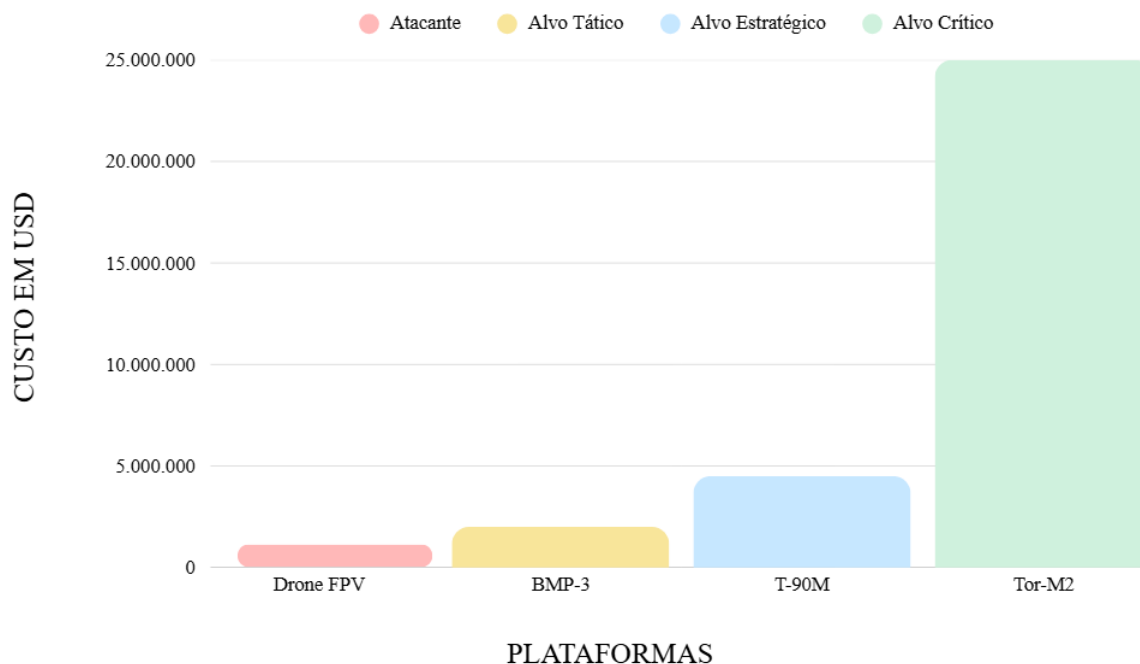
A guerra russo-ucraniana oferece um ambiente empírico particularmente adequado para essa análise, por se tratar de um conflito prolongado, de alta intensidade, no qual ambos os lados enfrentam restrições significativas de recursos e operam sob constante pressão operacional. Nesse contexto, mudanças que alteram a relação entre custos, riscos e efeitos militares tendem a produzir efeitos estratégicos desproporcionais, mesmo quando associadas a

meios tecnicamente simples ou de baixo custo unitário (Watling; Reynolds, 2023; Fedorchak, 2024).

Um dos efeitos mais frequentemente apontados na literatura sobre o emprego de drones FPV na Ucrânia refere-se à alteração da balança de custo-benefício das operações aéreas. Tradicionalmente, o emprego do poder aéreo esteve associado a plataformas de alto custo, elevada complexidade técnica e significativa dependência de infraestrutura industrial e logística. Aeronaves tripuladas, munições guiadas de precisão e sistemas avançados de ISR exigem investimentos substanciais e apresentam custos de reposição elevados, tornando sua perda operacionalmente e politicamente sensível (Olsen, 2010; Haun; Jackson; Schultz, 2022).

No caso ucraniano, a introdução e difusão de drones FPV operando como munições guiadas improvisadas contribuíram para romper parcialmente essa lógica. Ao permitir o engajamento preciso de alvos de alto valor – como veículos blindados, peças de artilharia, sistemas de defesa aérea e posições fortificadas – a um custo unitário significativamente inferior ao de mísseis guiados tradicionais, os FPVs alteraram a relação entre investimento e efeito militar. Estudos empíricos indicam que drones FPV, com custos unitários estimados entre US\$ 400 e US\$ 500, passaram a ser empregados contra alvos cujo valor supera em múltiplas ordens de grandeza o custo do meio empregado, produzindo uma assimetria de custos favorável ao defensor (Bronk; Watling, 2024; Mittal; Goetz, 2025). O gráfico abaixo demonstra justamente essa assimetria de custos (ver Figura 13), evidenciando como plataformas de baixo custo, como os drones FPV (estimados em \$500), atuam como multiplicadores de força capazes de neutralizar ativos de alto valor agregado, como o sistema de defesa aérea *Tor-M2* (estimado em \$25.000.000).

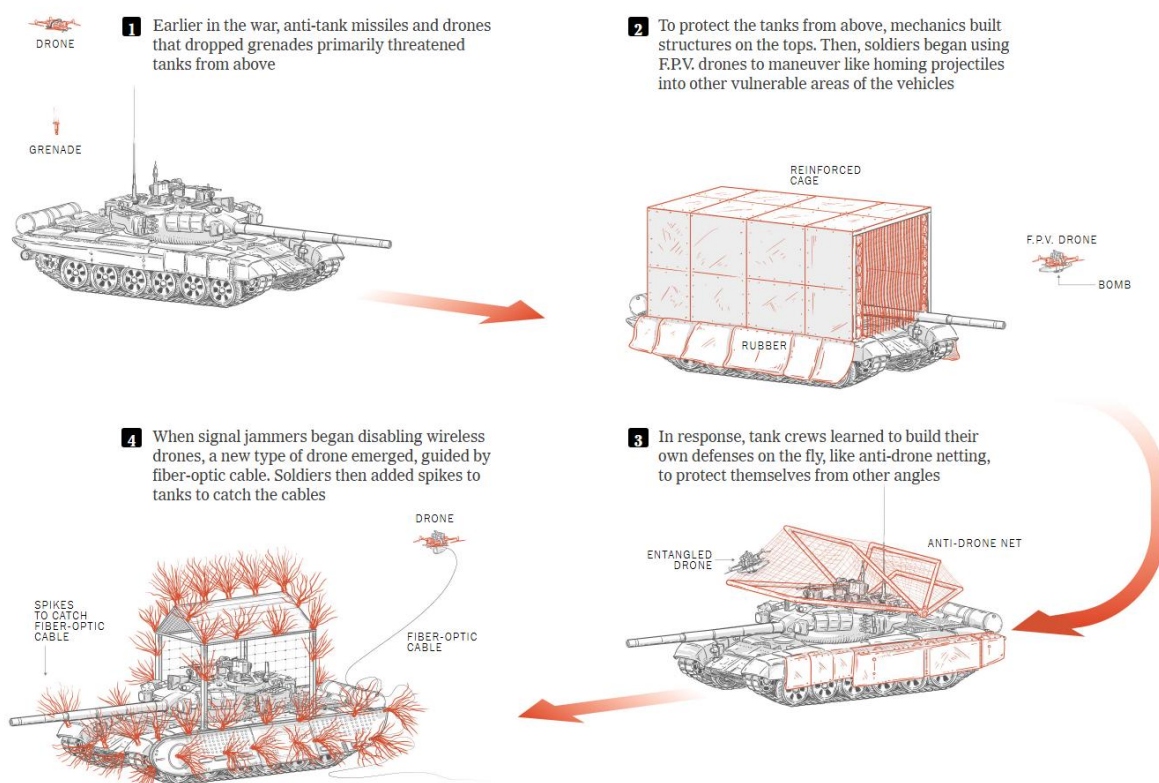
FIGURA 13 – Assimetria de custos



Fonte: elaborado pela autora a partir de Mittal e Goetz (2025).

Essa reconfiguração da economia do combate possui implicações operacionais imediatas. Em primeiro lugar, ela amplia a tolerância organizacional à perda de meios. Diferentemente de aeronaves tripuladas ou de munições de alto valor, drones FPV são concebidos como sistemas descartáveis (*attritable*), cuja perda é esperada e incorporada ao planejamento operacional. Essa característica reduz o risco político e psicológico associado ao emprego aéreo e permite maior ousadia tática, especialmente em ambientes densamente contestados por defesa aérea e guerra eletrônica (Scharre, 2018; Rogers, 2024). A viabilidade dessa estratégia de atrito é sustentada por uma escala de produção massiva: no início de 2025, a Ucrânia atingiu a marca de 200.000 drones FPV produzidos mensalmente, permitindo uma saturação constante da linha de frente, buscando a compensação das altas perdas (Darwish, 2025).

Em segundo lugar, a difusão de drones FPV impõe custos adicionais ao adversário, que se vê obrigado a investir de forma desproporcional em contramedidas defensivas. A proteção de veículos, posições e infraestruturas contra ataques de drones de baixo custo exige o emprego de sistemas de guerra eletrônica, defesa aérea de curto alcance (SHORAD), *cope cages* (gaiolas improvisadas) (ver Figura 14) e dispersão de forças. Isso cria um ciclo de custo da defesa desfavorável, onde o defensor gasta mísseis interceptadores caros ou degrada a mobilidade de suas tropas para parar ameaças baratas (Watling; Reynolds, 2025; Slusher, 2025).

FIGURA 14 – Ilustração dos *cope cages*

Fonte: The New York Times (2025)

Além de reconfigurar a economia do combate, o emprego de drones FPV contribui para uma redefinição mais ampla do poder aéreo no campo de batalha. Tradicionalmente, o poder aéreo foi concebido como um domínio hierárquico, associado ao controle do espaço aéreo por meio de aeronaves tripuladas e campanhas estratégicas centralizadas (Olsen, 2010; Fedorchak, 2020). O caso ucraniano desafia essa concepção ao demonstrar que efeitos aéreos significativos podem ser gerados a partir de plataformas simples, operadas no nível tático (pelotão ou companhia), integradas horizontalmente a unidades terrestres.

Nesse sentido, drones FPV ampliam o acesso ao domínio aéreo, permitindo que unidades de infantaria, artilharia e forças territoriais incorporem capacidades aéreas orgânicas. Isso resulta no que Rogers (2024) denomina de uma “democratização da letalidade”, onde a capacidade de ataque aéreo de precisão não é mais monopólio da Força Aérea, mas uma ferramenta distribuída ao longo de toda a linha de frente (Rogers, 2024; Kunertova, 2023b; Bondar, 2024a). Segundo o Tenente-General Ivan Havryliuk, a USF centraliza a doutrina e o treinamento para garantir que sistemas não tripulados operem na linha zero do combate, visando prioritariamente a preservação da vida humana (MoD, 2024f).

Essa descentralização possui implicações operacionais relevantes. Em vez de campanhas aéreas concentradas, observa-se uma multiplicação de microinterações aéreas distribuídas, reforçando a ideia de um campo de batalha transparente e letal. Contudo, essa reconfiguração enfrenta o desafio constante da guerra eletrônica. A eficácia dos drones FPV é altamente sensível à interferência de sinais, criando bolhas de negação de acesso onde a operação remota se torna impossível sem adaptação constante de frequências (Watling; Reynolds, 2023; Allen, 2025).

Em conjunto, os efeitos táticos e operacionais do emprego de drones FPV pela Ucrânia apontam para uma transformação significativa na forma como o poder aéreo é concebido e empregado. A reconfiguração da balança de custo-benefício e a descentralização do acesso ao domínio aéreo sugerem que esses sistemas produziram efeitos que vão além da eficácia tática imediata, exigindo novas doutrinas e estruturas organizacionais para sustentar essa inovação no longo prazo (Horowitz; Pindyck, 2023; Niederkofler, 2025).

A compreensão dos drones FPV como multiplicadores de força constitui um fundamento essencial para a análise da repercussão do conflito russo-ucraniano sobre a condução da guerra contemporânea. Esse conceito, amplamente utilizado na literatura militar, refere-se à capacidade de determinados meios, tecnologias ou práticas organizacionais ampliarem de forma desproporcional a eficácia de uma força armada, sem que isso implique aumentos correspondentes em efetivos, orçamento ou plataformas tradicionais (Fedorchak, 2024). No caso ucraniano, os drones FPV desempenharam esse papel ao potencializar a letalidade, a consciência situacional e a capacidade de interdição de unidades que operam sob severas restrições materiais, industriais e logísticas.

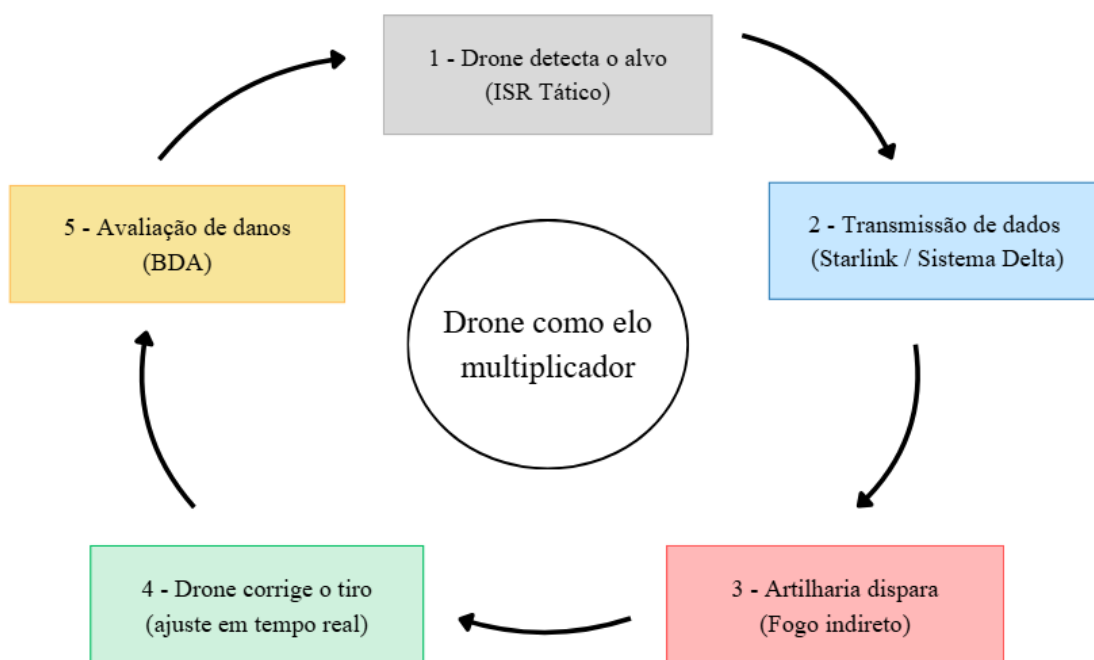
Desde os primeiros meses da guerra, a Ucrânia enfrenta a escassez de aeronaves, a vulnerabilidade de aeródromos e a superioridade quantitativa russa em sistemas de longo alcance criaram um ambiente no qual o emprego de plataformas tradicionais se tornava progressivamente mais arriscado (Watling; Reynolds, 2023).

Nesse contexto, a emergência dos drones FPV como instrumentos de ataque de precisão de baixo custo respondeu a uma necessidade operacional concreta: produzir efeitos cinéticos relevantes sem incorrer nos riscos e custos associados a meios tripulados ou a munições de alto valor. Este efeito é maximizado pela integração desses sensores táticos a sistemas de gestão de batalha digitalizados, como o *Delta* e o *GIS Arta*, que funcionam como o elo dessa multiplicação, permitindo que o dado bruto do drone FPV se converta em inteligência acionável para múltiplos níveis de comando em tempo quase real (Kreetz et al., 2025; Darwish, 2025).

O caráter multiplicador desses vetores manifesta-se, em primeiro lugar, na ampliação da capacidade ofensiva de pequenas unidades. Ao permitir que pelotões e companhias na linha de frente disponham de meios orgânicos de reconhecimento e ataque, os FPVs reduziram a dependência de apoio externo imediato, seja da artilharia pesada, seja da aviação. Essa autonomia relativa aumentou a capacidade de resposta tática, permitindo que as forças ucranianas explorassem alvos de oportunidade e reagissem rapidamente a movimentos adversários. A literatura empírica indica que essa capacidade foi particularmente relevante em ambientes de combate fragmentados, onde a velocidade do ciclo de decisão (*kill chain*) tende a ser decisiva (Watling, 2023; Beaudoin *et al.*, 2023).

Além disso, esses sistemas atuaram como extensores funcionais da artilharia. Em vez de substituí-la, passaram a operar na correção de tiros e na identificação de alvos. Essa integração ampliou a eficiência relativa dos fogos ucranianos, permitindo economizar munição e reduzir o tempo entre detecção e engajamento. Dessa forma, os drones FPV não apenas ampliaram a letalidade direta, mas potencializam o desempenho de outros meios, característica típica de um multiplicador de força (Zabrodskyi *et al.*, 2022) (ver Figura 15).

FIGURA 15– Ciclo Operacional: integração drone-artilharia



Fonte: elaborado pela autora a partir de Watling (2023) e Zabrodskyi *et al.* (2022).

Outro aspecto central refere-se à alteração da relação entre risco humano e efeito militar. Diferentemente de aeronaves tripuladas, o emprego de drones FPV reduz significativamente a exposição direta de operadores ao fogo inimigo. Embora as tripulações permaneçam vulneráveis à detecção eletrônica, o risco imediato associado ao engajamento é substancialmente menor. Essa redução contribui para ampliar a disposição organizacional ao emprego reiterado desses sistemas, mesmo em ambientes altamente contestados, reforçando sua função em um contexto de guerra de desgaste (Scharre, 2018; Rogers, 2024).

A tolerância institucional à perda de meios constitui outro elemento relevante. Concebidos como sistemas descartáveis, os FPVs possuem taxas de atrito esperadas elevadas, contrastando com plataformas tradicionais cuja perda gera implicações políticas e operacionais severas. A aceitação dessas perdas foi compensada pela capacidade de reposição rápida e pelo baixo custo unitário, permitindo manter pressão constante sobre o adversário e impor-lhe custos cumulativos (Niederkofler, 2025).

Do ponto de vista adversário, a proliferação desses drones impôs custos defensivos desproporcionais. E esses custos resultam em *trade-offs* operacionais, como a redução da mobilidade e o aumento da complexidade logística. Assim, mesmo quando não produziam efeitos cinéticos diretos, os FPVs contribuíam para degradar a eficiência operacional inimiga (Watling; Reynolds, 2025) (ver Quadro 7).

QUADRO 7 – Efeitos diretos e indiretos dos drones FPV

Efeito Cinético Direto (Destruição)	Efeito Indireto (Imposição de custos e adaptação)
Destruição de Blindados: Neutralização de tanques (MBT), veículos de combate de infantaria (IFV) e artilharia autopropulsada através de ataques de precisão nas áreas vulneráveis (torre, motor).	Proteção Física Passiva: Obrigatoriedade de instalação de <i>cope cages</i> (gaiolas), redes e blindagem de ripas, resultando em aumento de peso, redução da velocidade e menor manobrabilidade dos veículos.
Supressão de Infantaria: Ataques antipessoal em trincheiras e campo aberto, forçando a infantaria a permanecer abrigada e limitando a manobra tática.	Proteção Eletrônica Ativa: Necessidade de equipar cada veículo e pelotão com sistemas de Guerra Eletrônica (<i>jammers</i>) portáteis (ex: sistema <i>Volnarez</i>), elevando drasticamente o custo por unidade.
Interdição Logística: Ataques contra veículos de suprimento não blindados na “última milha”, cortando o fluxo de munição e provisões para a linha de frente.	Dispersão Logística: Força a descentralização dos depósitos de munição e combustível para evitar detecção, tornando a logística mais complexa, lenta e ineficiente.
Neutralização de Defesa Aérea: Saturação e destruição de radares e lançadores de curto alcance (SHORAD) que tentam engajar os drones.	Assimetria de Custo: Exaustão financeira ao forçar o defensor a usar mísseis interceptadores caros ou canhões antiaéreos contra drones descartáveis e baratos.
Ataques a Fortificações: Capacidade de voar para dentro de <i>bunkers</i> e abrigos, negando a proteção tradicional das fortificações de campo.	Degradação Psicológica: O zumbido constante e a onipresença da vigilância criam um estado de estresse permanente, reduzindo o moral e a eficácia combativa da tropa.

Fonte: elaborado pela autora a partir de Watling; Reynolds (2023) e Mittal; Goetz (2025).

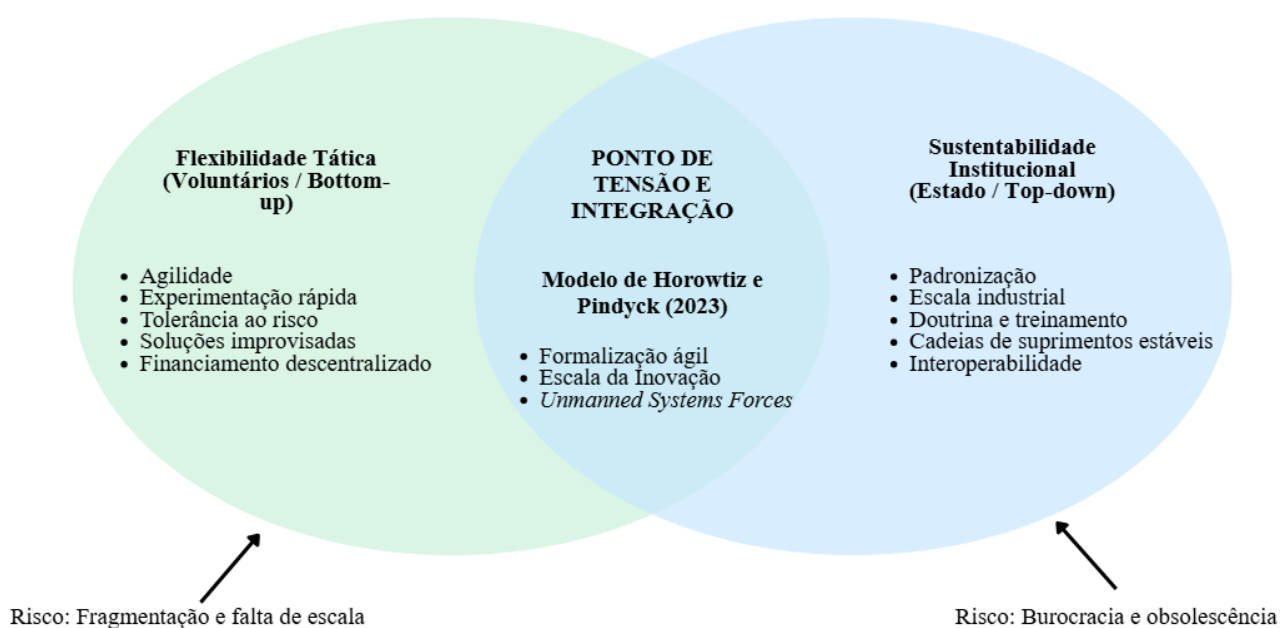
A função multiplicadora também se manifesta na dimensão temporal. Em guerras prolongadas, a sustentabilidade das operações é crítica. Os FPVs permitiram à Ucrânia manter um nível de pressão ofensiva constante, mitigando flutuações no fornecimento de munições convencionais. Ao oferecer uma alternativa de rápida reposição, esses vetores ampliaram a resiliência operacional das forças ucranianas frente à escassez material (Kunertova, 2023).

Entretanto, a análise exige reconhecer limites importantes. O primeiro refere-se à vulnerabilidade à guerra eletrônica. A eficácia dos FPVs é altamente sensível à interferência eletromagnética, resultando em taxas elevadas de falhas. Esse fator impõe um ciclo constante de adaptação técnica, onde a vantagem é temporalmente limitada e dependente de inovação contínua em frequências e software (Allen, 2025; Mittal; Goetz, 2025).

Outro limite diz respeito à escala dos efeitos. Embora eficazes taticamente, os drones FPV não produzem efeitos estratégicos independentes, como o controle do espaço aéreo em profundidade ou a destruição de infraestrutura industrial adversária. Eles operam como complementos, não substitutos, de campanhas aéreas e terrestres tradicionais. Além disso, a dependência de cadeias de suprimento comerciais (*dual-use*) expõe o ecossistema a vulnerabilidades externas e restrições de exportação (Niederkofler, 2025).

Do ponto de vista organizacional, observa-se uma tensão entre flexibilidade e institucionalização. A eficácia inicial esteve associada à descentralização e iniciativa local, mas a consolidação dessas práticas em estruturas formais – como a criação da USF – pode enrijecer procedimentos. Essa tensão é recorrente na literatura sobre inovação militar e se manifesta de forma aguda em contextos de guerra em curso (Bondar, 2024a; Horowitz; Pindyck, 2023) (ver Figura 16).

FIGURA 16 – O dilema da inovação em guerra



Fonte: elaborado pela autora a partir de Bondar (2024a) e Horowitz e Pindyck (2023).

Apesar desses limites, a análise do caso ucraniano sugere que os drones FPV cumpriram, de maneira consistente, o papel de multiplicadores de força. Eles ampliaram a capacidade ofensiva, reduziram riscos humanos e impuseram custos assimétricos. Nesse sentido, sua função não deve ser interpretada como evidência automática de inovação militar revolucionária, mas como um indicador empírico relevante de mudança operacional com potencial inovador.

A distinção entre adaptação contingente e inovação duradoura dependerá da capacidade de sustentar e institucionalizar essas práticas, tema que será aprofundado na aplicação do modelo de Horowitz e Pindyck (2023).

Até este ponto, o trabalho apresentou evidências empíricas e interpretações desenvolvidas por diferentes autores acerca do emprego de drones no conflito russo-ucraniano. Importa sublinhar que tais interpretações não são tomadas como conclusões definitivas, mas como material analítico a ser examinado de maneira sistemática. A seção seguinte, portanto, desloca o foco da descrição para o teste teórico, distinguindo explicitamente entre as avaliações produzidas por terceiros e a inferência desenvolvida nesta dissertação.

3.2 Aplicação do modelo de Horowitz e Pindyck (2023) ao caso ucraniano: análise de congruência e das hipóteses

Esta seção aplica o modelo de inovação militar proposto por Horowitz e Pindyck (2023) ao emprego de drones aéreos FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia, valendo-se do método de análise de congruência. Conforme discutido no Capítulo 1, a análise de congruência não se destina à identificação de relações causais no sentido estatístico, mas à avaliação sistemática da compatibilidade entre expectativas teóricas concorrentes e padrões empíricos observáveis em um caso específico. A força da inferência, nesse método, deriva do acúmulo de evidências consistentes, da exigência dos observáveis selecionados e da capacidade de discriminar entre explicações alternativas plausíveis (Van Evera, 1997; George; Bennett, 2005).

Essa opção metodológica é particularmente adequada para o estudo da inovação militar em contextos de guerra prolongada, nos quais mudanças organizacionais, tecnológicas e doutrinárias se desenvolvem de forma gradual, frequentemente não linear e sob condições de intensa incerteza. Diferentemente de abordagens que buscam identificar “revoluções” claramente delimitadas no tempo, a análise de congruência permite captar trajetórias intermediárias de mudança, marcadas por avanços, retrocessos e adaptações contínuas. No caso ucraniano, essa característica é central, uma vez que o emprego de drones FPV evolui sob pressão operacional constante, elevada assimetria material e rápida adaptação adversária, fatores que dificultam a consolidação de práticas inovadoras no sentido forte do termo.

Até este ponto da dissertação, buscou-se evitar interpretações deterministas acerca do papel dos drones no conflito russo-ucraniano. Parte significativa do debate público e mesmo acadêmico tende a tratar a difusão acelerada de drones como evidência automática de inovação militar profunda. Esta seção parte deliberadamente de um critério analítico mais restritivo. Não

basta que uma prática seja eficaz, amplamente difundida ou visível no campo de batalha para que se configure inovação militar. Conforme argumentam Horowitz e Pindyck (2023), a inovação militar exige efeitos mensuráveis e sustentados na forma como o poder militar é gerado e empregado, implicando integração consistente entre dimensões tecnológicas, organizacionais e doutrinárias. Assim, o objetivo desta seção é testar, de forma exigente, se a adoção de drones FPV pela Ucrânia satisfaz esses critérios ou se permanece mais adequadamente classificada como adaptação tática contingencial.

3.2.1 Invenção, incubação e implementação

O emprego de drones FPV pelas Forças Armadas da Ucrânia emerge como uma solução improvisada e descentralizada, baseada na recombinação criativa de tecnologias comerciais de uso dual, adaptadas para fins militares em resposta direta às restrições estruturais impostas pelo conflito. A literatura a parte de Kunertova (2023a; 2023b), Watling e Reynolds (2023), Fedorchak (2024), Rogers (2024), Renic e Christensen (2024) e relatórios de centros como o RUSI, CSIS e RAND sustentam o argumento que essas iniciativas não foram inicialmente impulsionadas por programas formais de aquisição, planejamento estratégico centralizado ou diretrizes doutrinárias consolidadas. Ao contrário, surgiram a partir de unidades de linha de frente, redes de voluntários, engenheiros civis e iniciativas locais, caracterizando um processo tipicamente *bottom-up*.

QUADRO 8 – Invenção (Horowitz; Pindyck, 2023)

Dimensão	Conteúdo
Etapas do modelo	Invenção
Definição teórica	Surgimento de novas práticas ou formas de empregar meios existentes para resolver problemas operacionais específicos, frequentemente fora dos canais institucionais formais; não implica inovação consolidada.
Nível predominante	Tático-operacional
Atores centrais	Unidades de linha de frente; redes de voluntários; engenheiros civis; iniciativas locais
Características principais	Processo bottom-up; improvisação; recombinação criativa de tecnologias comerciais (dual-use / COTS); ausência de planejamento centralizado
Observáveis empíricos	Emprego inicial de drones FPV como munições guiadas improvisadas; adaptação de drones comerciais para ataque terminal; inexistência de doutrina formal; elevada taxa de falha; curta vida útil operacional; alta vulnerabilidade à guerra eletrônica russa
Limites identificados	Baixa padronização; desempenho instável; dependência de cadeias comerciais globais; ausência de sustentabilidade estrutural
Classificação analítica	Evidência clara de invenção, mas insuficiente para caracterizar inovação militar

Fonte: elaborado pela autora.

Conforme ilustrado no Quadro 8, podemos observar que esse padrão se torna congruente com a definição de invenção proposta por Horowitz e Pindyck (2023), segundo a qual novas práticas militares podem surgir fora dos canais institucionais tradicionais, especialmente em contextos de guerra prolongada, escassez material e ameaça existencial. A invenção, nesse sentido, não se refere à criação de uma tecnologia radicalmente nova, mas à identificação de novas formas de empregar meios existentes para resolver problemas operacionais específicos. No caso ucraniano, a invenção reside menos no drone em si e mais na sua adaptação como vetor cinético de precisão de baixo custo, capaz de substituir parcialmente munições guiadas de precisão indisponíveis ou excessivamente caras.

Nesse sentido, a própria natureza *bottom-up* da invenção ucraniana impõe um desafio adicional ao modelo de Horowitz e Pindyck (2023): a fragilidade do ecossistema sociotécnico ucraniano, como salientado pelo general Zaluzhnyi (2023), que frisou a importância de uma base industrial ucraniana soberana. Em um cenário mais robusto, inovações são maturadas com apoio de complexos industriais de defesa mais sólidos, mas o processo de (re)invenção do drone

FPV na Ucrânia é dependente de uma cadeia de suprimentos global de componentes civis (*dual-use*), o que Niederkofler (2025) chama de “vulnerabilidade de prateleira”. Logo, embora a recombinação criativa tenha sido rápida, frente aos dilemas do campo de batalha, ainda assim carece de uma autonomia industrial que tende a sustentar a longo prazo e de forma mais estável processos de inovação de alta intensidade. Portanto, a invenção aqui é reflexo de uma junção da agilidade de resistência com a dependência tecnológica e de material bélico tradicional, e esse paradoxo molda o tipo de sustentabilidade de todo o ciclo de inovação.

Todavia, é fundamental enfatizar que a invenção, por si só, não configura inovação militar. Nos estágios iniciais do conflito, os drones FPV apresentavam taxas elevadas de falha, baixa padronização, grande variabilidade de desempenho e extrema vulnerabilidade à guerra eletrônica russa, associado ao fato de que partiam de uma iniciativa civil em sustentar o esforço de aquisição desses equipamentos. Relatórios do RUSI indicam que, em muitos setores da frente, a expectativa de vida operacional de um drone FPV era de poucos voos, ou mesmo de uma única missão, em razão da densidade de interferência eletromagnética e das limitações técnicas dos sistemas comerciais adaptados (Watling; Reynolds, 2023). Essas características restringiam significativamente o efeito sistêmico dessas práticas e reforçam a distinção analítica entre invenção e inovação.

A fase de incubação, que de acordo com Horowitz e Pindyck (2023) (ver Quadro 9) se trata de uma fase de aprendizado organizacional, ou seja, período no qual o *feedback* de exercícios, testes e do próprio combate se tornam importantes para identificar incompatibilidades e limitações doutrinárias já existentes, apresenta evidências mais densas, porém também mais ambíguas. Entre 2022 e 2024, observa-se um processo intenso de aprendizagem em combate, no qual táticas, técnicas e procedimentos associados ao emprego de drones FPV foram continuamente ajustados com base no feedback do campo de batalha. Esse processo foi impulsionado tanto pela pressão operacional contínua quanto pela necessidade de compensar desvantagens estruturais em meios tripulados, munições convencionais e capacidade industrial.

QUADRO 9 – Incubação (Horowitz; Pindyck, 2023)

Dimensão	Conteúdo
Etapa do modelo	Incubação
Definição teórica	Fase de aprendizagem organizacional, na qual novas práticas são testadas, ajustadas e refinadas por meio de feedback de exercícios ou do combate; muitas iniciativas permanecem instáveis ou fracassam.
Nível predominante	Tático-operacional, com efeitos limitados no nível organizacional
Atores centrais	Unidades de combate; operadores especializados; desenvolvedores civis; estruturas militares intermediárias
Características principais	Aprendizado em combate; ajustes contínuos de TTPs; experimentação acelerada; resposta reativa às contramedidas adversárias
Observáveis empíricos	Integração parcial dos FPVs a ciclos ISR–artilharia; redução pontual do ciclo <i>sensor-to-shooter</i> ; uso recorrente para correção de fogos e ataques seletivos; desenvolvimento de IA terminal (ex.: <i>Saker Scout</i>); drones guiados por fibra óptica
Limites identificados	Ciclos rápidos de obsolescência; instabilidade tecnológica; dependência de mudanças frequentes de software e frequência; dificuldade de consolidação doutrinária
Classificação analítica	Incubação intensa, porém, instável e predominantemente reativa

Fonte: elaborado pela autora.

Entretanto, é preciso notar que a Ucrânia não apenas reage ao adversário, mas tenta antecipar o ciclo de obsolescência. O desenvolvimento de sistemas de IA para o estágio terminal do ataque (*targeting AI*), como o *Saker Scout*, e a implementação dos drones FPV guiados por fibra óptica, exemplificam uma tentativa de incubação acelerada para contornar a saturação do espectro eletromagnético (MoD Ukraine, 2024e; Darwish, 2025). Contudo, essa corrida armamentista de *software* não seria um entrave para a estabilização da inovação militar? Se a tecnologia muda a cada poucas semanas para sobreviver aos novos empecilhos, como é o caso da guerra eletrônica russa, a consolidação de uma doutrina e de um treinamento padronizado, acaba por tornar esse sistema em um modo de incubação não apenas permanente mas em formato reativo.

Durante esse período, os drones FPV passaram de experimentos isolados para ferramentas integradas, ainda que de forma desigual, a ciclos de reconhecimento, correção de fogos e ataques seletivos. Relatórios de Watling e Reynolds (2023; 2025) demonstram que,

quando empregados em conjunto com artilharia e sistemas de ISR, esses drones contribuíram para reduzir significativamente o ciclo *sensor-to-shooter*, aumentando a letalidade e a eficiência do emprego de fogos indiretos. Em determinados momentos, essa integração produziu efeitos táticos relevantes, especialmente na neutralização de alvos de alto valor a custos relativamente baixos.

Entretanto, a própria literatura empírica destaca que esse processo de incubação permaneceu profundamente instável. A intensificação da guerra eletrônica russa, aliada à rápida adaptação de contramedidas, produziu ciclos recorrentes de obsolescência rápida, exigindo constantes modificações técnicas, mudanças de frequência, ajustes de *software* e desenvolvimento de novas soluções improvisadas (Mittal; Goetz, 2025; Allen, 2025). Esse padrão sugere que a incubação ocorreu predominantemente em nível tático-operacional, sem alcançar a estabilização necessária para uma transição clara rumo à inovação institucional no sentido forte.

Por fim, a fase de implementação, entendida como institucionalização, difusão sistemática e incorporação a estruturas organizacionais e doutrinárias formais, constitui o ponto mais sensível e decisivo para o teste das hipóteses (ver Quadro 10). Uma vez que é nesse estágio que percebemos se a experimentação e as limitações identificadas na fase anterior foram levadas em consideração no emprego da força. Há evidências claras de esforços ucranianos nessa direção. A criação da Força de Sistemas Não Tripulados (*Unmanned Systems Forces*), a formalização de programas de treinamento e a tentativa de padronizar práticas anteriormente informais indicam um movimento deliberado em direção à implementação (Bondar, 2024a).

QUADRO 10 – Implementação (Horowitz; Pindyck, 2023)

Dimensão	Conteúdo
Etapa do modelo	Implementação
Definição teórica	Institucionalização, difusão sistemática e incorporação formal das novas práticas a estruturas organizacionais, doutrina e rotinas de comando; distingue inovação duradoura de adaptação contingente.
Nível predominante	Organizacional e doutrinário
Atores centrais	Ministério da Defesa; Estado-Maior; Forças Armadas; <i>Unmanned Systems Forces</i> (USF)
Características principais	Formalização organizacional; tentativas de padronização; criação de estruturas dedicadas; difusão vertical e horizontal
Observáveis empíricos	Criação da <i>Unmanned Systems Forces</i> (USF); programas formais de treinamento; esforços de coordenação entre unidades; tentativa de centralizar um ecossistema descentralizado
Limites identificados	Implementação heterogênea; resistência organizacional; dependência persistente de componentes comerciais; ausência de doutrina conjunta plenamente estabilizada
Classificação analítica	Implementação parcial, insuficiente para caracterizar inovação militar de alta intensidade

Fonte: elaborado pela autora.

Não obstante, a criação da *Unmanned System Forces* (USF) em fevereiro pode ser avaliada não apenas como um marco administrativo, mas como uma tentativa de superar o *gap* entre a adaptação tática e a escala de produção industrial. Ostafiichuk, Budden e Murray (2025) sugerem que a institucionalização enfrenta a resistência de estruturas militares legadas e a dificuldade de centralizar um ecossistema que surgiu e prosperou justamente pela descentralização e voluntariado. No entanto, enquanto a Ucrânia e USF não conseguirem unificar a miríade de “laboratórios de garagem” em uma base industrial de defesa coesa e integrada a um padrão, a implementação segue num domínio emergencial, sem atingir a profundidade institucional que caracteriza a inovação militar duradoura.

Contudo, é importante notar os limites estruturais do caso. Em primeiro lugar, a implementação permanece altamente heterogênea, variando significativamente entre unidades, setores da frente e níveis de comando. Em segundo lugar, a dependência persistente de componentes comerciais e de cadeias de suprimento externas impõe vulnerabilidades logísticas e estratégicas que limitam a sustentabilidade de longo prazo dessas capacidades (Niederkofler,

2025). Em terceiro lugar, não há evidência robusta de integração plena dos drones FPV a uma doutrina conjunta estabilizada, capaz de orientar seu emprego de forma consistente ao longo do tempo e em diferentes contextos operacionais.

Assim, embora existam indícios claros de implementação parcial, estes não satisfazem plenamente os critérios de institucionalização profunda associados à inovação militar de alta intensidade. O emprego de drones FPV permanece fortemente condicionado à necessidade de adaptação contínua, à improvisação técnica e à aceitação de elevadas taxas de atrito, características mais compatíveis com processos adaptativos do que com inovação consolidada.

3.2.2 Análise de congruência e teste das hipóteses

A análise de congruência permite agora avaliar de forma sistemática qual das hipóteses formuladas apresenta maior poder explicativo à luz das evidências empíricas. A força da inferência, nesse método, depende não apenas da presença de observáveis compatíveis com uma hipótese, mas da capacidade de excluir ou enfraquecer explicações alternativas plausíveis (Van Evera, 1997; George; Bennett, 2005).

Ainda que parte da literatura especializada qualifique o emprego de drones FPV como inovador, esta análise adota um critério mais exigente. A classificação como inovação militar não decorre da repetição de avaliações presentes em relatórios especializados, mas do grau de correspondência entre os observáveis empíricos e as expectativas teóricas derivadas do modelo de Horowitz e Pindyck (2023). Assim, interpretações externas são aqui tratadas como evidências a serem avaliadas, e não como conclusões a serem reproduzidas.

A hipótese de pesquisa (H1), que sustenta que o emprego de drones FPV pela Ucrânia configura inovação militar de alta intensidade, estabelece expectativas teóricas exigentes. Ela pressupõe integração sustentada nas dimensões tecnológica, organizacional e doutrinária, efeitos duradouros na geração de poder militar e relativa estabilidade frente à adaptação adversária. Quando confrontada com o conjunto das evidências empíricas analisadas ao longo desta dissertação, essa hipótese apresenta congruência limitada.

Embora os drones FPV tenham alterado, em determinados contextos, a balança de custo-benefício das operações táticas, tais efeitos mostraram-se altamente sensíveis à adaptação russa, especialmente no domínio da guerra eletrônica. A ausência de uma doutrina estabilizada, a fragmentação organizacional e a dependência de improvisação contínua indicam que os critérios de inovação de alta intensidade não são plenamente atendidos. Assim, o Quadro 11 sintetiza o teste da H1 e o porquê não pode ser sustentada de forma robusta

QUADRO 11 – Evidências observadas no caso ucraniano e teste de congruência das H1

Hipótese	Dimensão analítica	Evidências discutidas na dissertação	Interpretação analítica	Resultado do teste de congruência
H1 – O emprego de drones FPV configura inovação militar de alta intensidade	Tecnológica	Adaptação de drones comerciais para funções de ataque de precisão; uso de ogivas improvisadas; introdução de drones FPV controlados por fibra óptica e sistemas de IA terminal para contornar guerra eletrônica russa.	Evidencia capacidade de invenção e incubação acelerada, com soluções técnicas que alteram o custo do ataque de precisão, mas ainda dependentes de ciclos reativos de adaptação.	Congruência parcial
	Organizacional	Descentralização da produção; participação de redes civis e voluntários; criação da Unmanned Systems Forces; integração informal entre Estado, Forças Armadas e sociedade civil.	Indica aprendizado organizacional relevante, porém com baixa padronização e forte dependência de iniciativas bottom-up, dificultando consolidação institucional plena.	Congruência parcial
	Doutrinária	Emprego recorrente de FPVs em missões de ataque, correção de fogos e integração drone–artilharia; redução do ciclo sensor-to-shooter; ausência de doutrina formal consolidada.	Mudança prática observável na condução do combate, mas com institucionalização limitada e ainda fortemente contingente ao contexto da guerra.	Congruência baixa a média

Fonte: elaborado pela autora.

A hipótese alternativa (H2), que interpreta o fenômeno como adaptação tática contingencial e descentralizada, apresenta alta congruência com as evidências empíricas. Os padrões observados – descentralização, experimentação contínua, dependência de redes civis, eficácia localizada e dificuldade de institucionalização – correspondem de forma consistente às expectativas teóricas associadas a processos adaptativos em guerra (Grissom, 2006; Hoffman, 2021; Terhorst, 2025).

Importante destacar que essa classificação não implica irrelevância militar. Pelo contrário, adaptações táticas podem produzir efeitos operacionais significativos e duradouros, especialmente em contextos de assimetria. Contudo, sob os critérios estritos do modelo de Horowitz e Pindyck (2023), tais adaptações não se qualificam automaticamente como inovação militar de alta intensidade. Assim, H2 emerge como a hipótese com maior poder explicativo.

QUADRO 12 – Evidências observadas no caso ucraniano e teste de congruência das H2

Hipótese	Dimensão analítica	Evidências discutidas na dissertação	Interpretação analítica	Resultado do teste de congruência
H2 – O emprego de drones FPV constitui adaptação tática contingencial	Tecnológica	Alta taxa de perda dos drones; vulnerabilidade à guerra eletrônica; rápida obsolescência de soluções técnicas; necessidade constante de ajustes incrementais.	Evidência clara de adaptação funcional orientada pela pressão operacional, com eficácia tática imediata, mas efeitos sistêmicos instáveis.	Congruência alta
	Organizacional	Aprendizado em combate contínuo; ajustes rápidos de TTPs; disseminação desigual entre unidades; ausência de padronização plena de treinamento.	Compatível com um modelo de adaptação descentralizada, sem consolidação estrutural duradoura.	Congruência alta
	Doutrinária	Predominância de práticas informais; inexistência de CONOPS estáveis; doutrina em constante revisão devido à guerra eletrônica adversária.	Reforça a interpretação de que o emprego de FPVs permanece no limiar entre inovação e adaptação, sem ruptura doutrinária consolidada.	Congruência alta

Fonte: elaborado pela autora.

Por fim, a hipótese nula H0, que pressupunha que o emprego dos drones FPV não demonstra relevância no estágio de inovação militar, apresenta baixa congruência com o material empírico analisado (ver Quadro 12). A persistência do emprego de drones FPV ao longo do tempo, sua difusão ampla, sua integração recorrente a operações combinadas e seus efeitos mensuráveis sobre o campo de batalha afastam a interpretação de marginalidade. Dessa forma, H0 pode ser rejeitada com elevado grau de confiança.

QUADRO 13 – Evidências observadas no caso ucraniano e teste de congruência das H0

Hipótese	Dimensão analítica	Evidências discutidas na dissertação	Interpretação analítica	Resultado do teste de congruência
H0 – O emprego de drones FPV não configura inovação militar relevante	Geral	Impactos mensuráveis na balança custo-benefício; neutralização de alvos de alto valor; efeitos operacionais sustentados ao longo do conflito.	Evidências empíricas refutam a hipótese nula, uma vez que os FPVs produzem efeitos militares significativos e recorrentes.	Hipótese rejeitada

Fonte: elaborado pela autora.

O teste de congruência conduz à seguinte conclusão: dentro do recorte temporal definido, entre fevereiro de 2022 e agosto de 2025, o caso ucraniano constitui um exemplo robusto de adaptação tática altamente eficaz, mas ainda não de inovação militar plenamente

consolidada. Paradoxalmente, é precisamente essa condição intermediária que torna o caso teoricamente relevante. Ele evidencia como processos adaptativos podem produzir efeitos operacionais pertinentes sem necessariamente culminar em inovação institucional profunda, sendo processos contingentes, reversíveis e permanentemente condicionados pelo atrito da guerra (Slusher, 2025; Horowitz; Pindyck, 2023).

Por fim, a aceitação da H2 (adaptação tática) infere uma reflexão sobre a temporalidade da mudança militar em conflitos de alta intensidade. Por sua vez, a análise de congruência sugere que o caso ucraniano pode estar forçando uma revisão do próprio conceito de “inovação de alta intensidade”. Se a Ucrânia conseguir sustentar os efeitos operacionais dos drones através de uma rede de adaptações constantes, ainda que sem a estabilidade doutrinária clássica, talvez coloque uma nova categorização de “inovação ágil”.

Como alerta Slusher (2025), o risco de classificar o caso ucraniano estritamente como adaptação é subestimar os efeitos do *feedback* e autonomia do campo de batalha. Assim, embora a H2 seja a hipótese mais congruente hoje, o dinamismo do ecossistema ucraniano indica que o processo de inovação ainda permanece em aberto, sugerindo que o limiar entre adaptação e inovação é mais nebulosa do que o referencial teórico operacionalizado nesta dissertação permite visualizar em meio ao atrito da guerra.

Essa conclusão reforça a utilidade analítica do modelo de Horowitz e Pindyck ao permitir captar gradações de mudança e evitar classificações dicotômicas simplificadoras. Ao mesmo tempo, contribui para o debate mais amplo sobre inovação militar ao demonstrar que a eficácia operacional, embora necessária, não é condição suficiente para caracterizar inovação de alta intensidade.

CONCLUSÃO

A presente dissertação se propôs a responder a seguinte pergunta de pesquisa: em que estágio do processo de inovação militar se encontra o emprego de drones aéreos *first-person-view* (FPV) pela Ucrânia? Nos propomos a analisar a dimensão aérea do conflito russo-ucraniano, deflagrado em fevereiro de 2022, partindo de um cenário de alta intensidade em que a assimetria material e a pressão russa exigiram da Ucrânia uma resposta que fosse além do uso da aviação tripulada tradicional.

De modo a sustentar a análise, o trabalho se estruturou em torno do modelo teórico de inovação militar proposto por Horowitz e Pindyck (2023), que distingue o processo de inovação em invenção, incubação e implementação. Para além disso, estabelecemos uma gradação de inovação militar que pudesse englobar os aspectos tecnológicos, organizacionais e doutrinários, a fim de identificar o estágio em que a Ucrânia se localiza, ainda que com a guerra em curso. O objetivo foi verificar se o uso massivo dessas plataformas de baixo custo representaria uma inovação de alta intensidade, capaz de alterar estruturalmente a geração de poder militar, ou se permaneceria no campo da adaptação tática contingencial. A aplicação do método de análise de congruência permitiu confrontar as expectativas teóricas com a materialidade observada no recorte temporal entre fevereiro de 2022 e agosto de 2025.

A análise das evidências disponíveis permitiu o teste das três hipóteses formuladas previamente. A hipótese nula (H0), que sugeria a irrelevância do fenômeno para a inovação militar, foi rejeitada devido à escala e à persistência do uso de drones FPV, que se tornaram multiplicadores de força indispensáveis para as Forças Armadas Ucranianas. A diferenciação entre os aspectos de inovação de alta intensidade (H1) e de adaptação tática (H2) exigiu maior atenção e critério de avaliação mais exigente, uma vez que, no modelo de Horowitz e Pindyck (2023), a inovação militar requer não apenas eficácia tática, mas uma institucionalização profunda que integre os aspectos tecnológicos, organizacionais e doutrinários de forma estável, sob pena de se tornar um ciclo infinito de tentativas de inovação.

Embora a criação da Força de Sistemas Não Tripulados (USF) em fevereiro de 2024 represente um marco na tentativa de transição da adaptação tática para a formalização organizacional, sua existência, por si só, não constitui condição suficiente para classificar o caso ucraniano como uma inovação militar de alta intensidade no atual estágio do conflito. A consolidação de uma *major innovation* pressupõe não apenas a criação de novas estruturas burocráticas, mas a sustentabilidade e a autonomia da nova capacidade de gerar poder militar a longo prazo. A USF, apesar de centralizar a doutrina, ainda opera sob a lógica da adaptação sob

restrição, mantendo dependência de tecnologias comerciais de uso dual e de cadeias de suprimentos externas. Ademais, a eficácia desses sistemas permanece instável devido ao ciclo acelerado de obsolescência imposto pelas contramedidas de guerra eletrônica russas e pela própria capacidade de adaptação do inimigo. Assim, se observada apenas a criação da USF, conclui-se que ela sinaliza o início da implementação, mas não configura uma ruptura estrutural plena.

Por conseguinte, a partir das evidências dispostas, a pesquisa demonstrou que a hipótese alternativa (H2) é a que possui maior poder explicativo para o caso ucraniano. O emprego de drones FPV incidiu em efeitos estratégicos e operacionais significativos, como a “democratização da letalidade” e a negação de manobra aos russos. No entanto, o fenômeno da inovação militar na Ucrânia permanece em um centro fragmentado, localizado em um ciclo de dependência de soluções improvisadas e de obsolescência tecnológica frente à capacidade de adaptação da Rússia. Conclui-se, portanto, que o caso ucraniano representa um processo de adaptação tática altamente eficaz, correspondendo a um grau médio de inovação militar, que ainda precisa atingir um estágio plenamente consolidado.

Ainda assim, a análise do caso revela elementos que tensionam a própria literatura sobre inovação militar. Embora a literatura clássica privilegie o desenvolvimento estatal, frequentemente associado a programas centralizados, *major weapon systems* e reformas organizacionais conduzidas por altas burocracias (Posen, 1984; Rosen, 1991; Horowitz; Pindyck, 2023), o caso ucraniano revela uma anomalia sistêmica intrigante: a emergência de um padrão de inovação *bottom-up*, ainda que sendo um ator estatal, caracterizado por experimentação descentralizada, integração civil-militar informal e ciclos acelerados de adaptação tecnológica. A incorporação massiva de drones FPV não foi resultado de um programa estatal planejado segundo modelos tradicionais de aquisição e desenvolvimento, mas emergiu de um ecossistema híbrido composto por voluntários, engenheiros civis, startups, redes de financiamento coletivo e unidades táticas com alto grau de autonomia.

Ignorar a agência dos atores civis na integração de drones não constitui apenas uma lacuna acadêmica; representa um erro de percepção estratégica que análises tradicionais insistem em reproduzir. Ao subestimar o papel do ecossistema tecnológico civil na geração de capacidades militares, corre-se o risco de interpretar o fenômeno ucraniano como mera adaptação contingencial, quando, na realidade, ele aponta para a redefinição dos mecanismos de produção de poder militar e da relação civil-militar, especialmente em contextos de assimetria. Logo, a inovação observada não se limita à tecnologia, mas reside na estrutura sociotécnica que sustenta sua rápida difusão, interação e integração ao campo de batalha. A

intensidade da inovação, nesse sentido, não deve ser avaliada exclusivamente pela formalização doutrinária ou pela institucionalização burocrática, mas também pela capacidade de absorver e escalar iniciativas emergentes oriundas de fora da estrutura militar tradicional.

De forma definitiva, um dos pontos mais relevantes no processo de pesquisa desta dissertação se refere ao papel do ecossistema de inovação militar ucraniana (também mencionado como ecossistema sociotécnico). A pesquisa evidenciou que a inovação militar contemporânea, em cenários de assimetria, também pode emergir a partir da articulação entre o Estado, Forças Armadas, startups de tecnologia e rede de voluntariado civil, saindo da centralidade do Estado. Nesse sentido, iniciativas como o cluster *Brave1* e o programa *Army of Drones* ilustram essa nova arquitetura de defesa, na qual o feedback do combate é incorporado à produção em ciclos de semanas. Entretanto, cabe ressaltar que em razão do prolongamento do conflito e a capacidade do inimigo em se adaptar às condições, esse sistema descentralizado dificulta a estabilização e consolidação organizacional e doutrinária para o combate.

Essa dinâmica sugere alterações na economia política do poder aéreo, que podem ser tema de investigações mais aprofundadas em pesquisas futuras. A introdução massiva de drones FPV rompeu a lógica tradicional baseada em plataformas de alto custo e baixa disponibilidade. Sob outro enfoque, o caso ucraniano tensiona as concepções clássicas de superioridade aérea. O emprego de drones FPV tornou o campo de batalha mais transparente e extremamente contestado, enquanto a redução do ciclo sensor-to-shooter por meio da integração drone-artilharia, amparada por sistemas como o *Delta* e a rede *Starlink*, permitiu o exercício descentralizado do poder aéreo no nível tático.

Nesse contexto, impõe-se uma reflexão estrutural para as Forças Armadas: até que ponto a burocracia militar contemporânea é capaz de sobreviver à velocidade de um ecossistema de inovação desregulamentado? Se a resposta institucional for a inércia – entendida como apego a ciclos longos de aquisição e dependência de grandes sistemas de armas – o conceito tradicional de poder aéreo enfrenta um desafio. O monopólio do domínio aéreo por plataformas tripuladas de alto custo passa a coexistir com enxames de sistemas mais baratos, descartáveis e disponíveis via redes digitais. A experiência ucraniana sugere que o poder aéreo contemporâneo enfrenta o dilema entre a manutenção de vetores sofisticados e de alto custo e a proliferação de pequenos drones capazes de operar por saturação. Nesse contexto, a balança de custo-benefício não está diretamente associada à simples posse de maior quantidade de drones FPV, mas ao modo como esses sistemas ampliam a eficiência dos meios convencionais como multiplicadores de força. Ao possibilitarem reconhecimento, designação de alvos e correção de fogo em tempo real, os drones permitem que um número reduzido de mísseis e munições guiadas produza efeitos

proporcionais muito superiores, redefinindo a lógica de emprego e a economia do poder aéreo contemporâneo.

Ainda que não tenha sido foco da presente dissertação, a pesquisa sobre o ecossistema sociotécnico ucraniano suscitou questionamentos sobre o modelo de relações civis-militares. Ao evidenciar que o aparato estatal não foi capaz, isoladamente, de sustentar o esforço tecnológico da guerra, o caso revela um arranjo em que a camada civil co-produz o instrumento militar. Essa dinâmica tensiona modelos clássicos de controle civil, ao mostrar que a sociedade civil pode assumir papel central na geração de capacidades militares.

No que se refere às limitações durante a pesquisa, a própria natureza do objeto — um conflito ainda em curso — impôs restrições temporais e documentais, dada a dificuldade de acesso a dados primários. A natureza dinâmica da guerra desafiou o modelo de inovação militar proposto, tratado em caráter processual no recorte entre fevereiro de 2022 e agosto de 2025. O uso de VPN foi necessário para acessar informações governamentais ucranianas, e, metodologicamente, por se tratar de estudo de caso único orientado pela análise de congruência, os resultados buscam inferência analítica e não generalização estatística.

As conclusões também oferecem subsídios para cenários de limitações orçamentárias, como o brasileiro. O Brasil enfrenta restrições de orçamento e dependência histórica de importação de componentes sensíveis. A experiência ucraniana demonstra que a integração de tecnologia comercial acessível a doutrinas flexíveis pode compensar, em parte, a escassez de plataformas de alto valor. No entanto, o caso ucraniano não deve ser lido como um manual de replicação, visto que a Ucrânia ainda está em guerra e lida com a própria questão de reordenamento orçamentário para tempos de guerra. Nesse sentido, as lições ucranianas se tornam ainda mais valiosas uma vez que países como o Brasil têm a capacidade de pensar a inovação sem a emergência de um conflito alterando as prioridades fundamentais da nação.

Exemplos nacionais, como o drone movido a jato da *Nest Design Aerospace* e o Nauru 100C da *Xmrobots*, indicam base tecnológica capaz de fomentar ecossistemas de inovação ágeis. Para a Defesa brasileira, uma das principais lições reside no fortalecimento da Base Industrial de Defesa (BID) por meio de parcerias entre Estado e setor privado, incorporando drones e suas respectivas contramedidas como parte da soberania nacional. A principal lição não está na replicação automática do modelo ucraniano, mas na reflexão sobre a compatibilidade entre estruturas burocráticas reguladas e ambientes de inovação distribuída. A adaptabilidade organizacional pode se tornar tão relevante quanto a capacidade industrial instalada.

Se o emprego de drones FPV constitui inovação militar de intensidade intermediária, ele revela transformação qualitativa na relação entre tecnologia, organização e sociedade.

Ignorar essa transformação pode significar manter investimentos alinhados a paradigmas operacionais em transição. Em suma, o emprego de drones FPV na Guerra da Ucrânia é exemplo da “democratização da letalidade” na guerra moderna. Embora classificado como adaptação tática, o fenômeno aponta para uma transição paradigmática da condução dos conflitos interestatais. A agilidade tecnológica sugere uma inovação acelerada que o referencial teórico ainda busca capturar. Logo, agendas de pesquisa subsequentes poderiam explicar o impacto da inteligência artificial no processo decisório na escolha de alvos dos drones – FPV e kamikaze – e como se configura o conceito de massa (*swarming*) frente à adaptação das contramedidas. A inovação militar do século XXI pode não emergir dos laboratórios estatais altamente financiados, mas das fricções do campo de batalha. Por fim, reafirma-se que a eficácia operacional não é condição suficiente para a inovação militar, mas é, inegavelmente, o laboratório onde o futuro da guerra está sendo escrito.

REFERÊNCIAS

ADAMSKY, Dima. **The culture of military innovation: the impact of cultural factors on the revolution in military affairs in Russia, the US, and Israel**. Stanford: Stanford University Press, 2010.

ADAMSKY, Dima; BJERGA, Kjell Inge (Orgs.). **Contemporary Military Innovation: Between Anticipation and Adaptation**. London: Routledge, 2012.

ALLEN, Gregory C. The Russia-Ukraine Drone War: Innovation on the Frontlines and Beyond. Transcript. Washington, D.C.: *Center for Strategic and International Studies (CSIS)*, May 28, 2025. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/russia-ukraine-drone-war-innovation-frontlines-and-beyond>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BASTOS JÚNIOR, Paulo Roberto. **Exército inicia a avaliação operacional do Nauru 1000C**. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/exercito-inicia-a-avaliacao-operacional-do-nauru-1000c/>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BEAUDOIN, Emily et al. **Commercialized Combat: Analyzing wartime applications of non-military technologies in the war in Ukraine**. Nova York: Columbia School of International and Public Affairs (SIPA), Apr. 2023. Disponível em: <https://www.sipa.columbia.edu/sipa-education/capstone-workshops/commercialized-combat-analyzing-wartime-applications-nonmilitary>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BERTHELSEN, Emilie. Hybrid times: War and peace in military innovation studies. *Journal of Strategic Studies*, p. 1–34, 2025. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01402390.2025.2512238>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BIDDLE, Stephen D. **Military power: explaining victory and defeat in modern battle**. Princeton, N.J Oxford: Princeton University Press, 2006.

BONDAR, Kateryna. Why Ukraine is Establishing Unmanned Forces Across Its Defense Sector and What the United States Can Learn from It. CSIS Commentary, Washington, D.C.: *Center for Strategic and International Studies*, Nov. 19, 2024a. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/why-ukraine-establishing-unmanned-forces>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BONDAR, Kateryna. Understanding the Military AI Ecosystem of Ukraine. 2024b. *Center for Strategic and International Studies*. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/understanding-military-ai-ecosystem-ukraine>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BONDAR, Kateryna. **How Ukraine’s Operation “Spider’s Web” Redefines Asymmetric Warfare**. 2025. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/how-ukraines-spider-web-operation-redefines-asymmetric-warfare>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BROWN, Steve. **Spiderweb – Statement of Intent, Capability More Important Than Numbers**. 2025. Disponível em: <https://www.kyivpost.com/analysis/53860>. Acesso em: 12 jan. 2026.

BUZAN, Barry; HERRING, Eric. **The Arms Dynamic in World Politics**. Boulder: Lynne Rienner Publishers, 1998.

CALCARA, Antonio; GILLI, Andrea; GILLI, Mauro; et al. Will the Drone Always Get Through? Offensive Myths and Defensive Realities. *Security Studies*, v. 31, n. 5, p. 791–825, 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09636412.2022.2153734>. Acesso em: 17 jan. 2026.

CARLOUGH, Molly; HARRIS, Benjamin. **Comparing the Size and Capabilities of the Russian and Ukrainian Militaries | Council on Foreign Relations**. Disponível em: <https://www.cfr.org/articles/comparing-size-and-capabilities-russian-and-ukrainian-militaries>. Acesso em: 17 jan. 2026.

CHAMAYOU, Grégoire. **A theory of the drone**. New York: The New Press, 2015.

CHEUNG, Tai Ming. A conceptual framework of defence innovation. *Journal of Strategic Studies*, v. 44, n. 6, p. 775–801, 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01402390.2021.1939689>. Acesso em: 17 jan. 2026.

CLAUSEWITZ, Carl von. **On war**. Princeton: Princeton University Press, 1984.

DARWISH, Abigail. **Ukrainian Military Tech Timeline and Analysis (2022–2025) — Bloomsbury Intelligence and Security Institute (BISI)**. Bloomsbury Intelligence & Security Institute (BISI). Disponível em: <https://bisi.org.uk/reports/ukrainian-military-tech-timeline-and-analysis-20222025>. Acesso em: 14 jan. 2026.

DEE, Stuart; FEDINA, Katja; SUMAN-CHAUHAN, Kiran; et al. **Invisible defender? Opportunities and challenges for integrating DEWs into Ukraine’s C-UAS framework**. RAND Europe, 2025. Disponível em: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA3833-7.html. Acesso em: 13 jan. 2026.

DEVORE, Marc R. “No end of a lesson:” observations from the first high-intensity drone war. *Defense & Security Analysis*, v. 39, n. 2, p. 263–266, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14751798.2023.2178571>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ECHEVARRIA, Antulio J. **Military strategy: a very short introduction**. Second edition. New York: Oxford University Press, 2024.

FARRELL, Theo; TERRIFF, Terry; OSINGA, Frans (orgs.). **A transformation gap? American innovations and European military change**. Stanford: Stanford University Press, 2014.

FEDORCHAK, Viktoriya. **Understanding contemporary air power**. Londres: Routledge, 2020.

FEDORCHAK, Viktoriya. **The Russia-Ukraine War: Towards Resilient Fighting Power**. Abingdon: Routledge, 2024.

GEORGE, Alexander L.; BENNETT, Andrew. **Case studies and theory development in the social sciences**. Cambridge: MIT Press, 2005.

GRAY, Colin S. **Strategy for chaos: revolutions in military affairs and the evidence of history**. Reprint ed. London: Cass, 2003.

GRIFFIN, Stuart. Military Innovation Studies: Multidisciplinary or Lacking Discipline?1. *Journal of Strategic Studies*, v. 40, n. 1–2, p. 196–224, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01402390.2016.1196358>. Acesso em: 17 jan. 2026.

GRISSOM, Adam. The future of military innovation studies. *Journal of Strategic Studies*, v. 29, n. 5, p. 905–934, 2006. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01402390600901067>. Acesso em: 12 jan. 2026.

GRUSZCZAK, Artur; KAEMPF, Sebastian (Ed.). **Routledge Handbook of the Future of Warfare**. Londres: Routledge, 2021.

FOX, Amos C. Precision Paradox and Myths of Precision Strike in Modern Armed Conflict. *The RUSI Journal*, v. 169, n. 1–2, p. 62–74, 2024. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/03071847.2024.2343717>. Acesso em: 17 jan. 2026.

HAMBLING, David. **Swarm troopers: how small drones will conquer the world**. Londres: Quercus, 2015.

HAUN, Phil M.; JACKSON, Colin F.; SCHULTZ, Timothy P. (Ed.). **Air Power in the Age of Primacy: Air Warfare since the Cold War**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

HERNANDEZ, Marco; GIBBONS-NEFF, Thomas. Tanks Were Just Tanks, Until Drones Made Them Change. **The New York Times**, 2025. Disponível em: <https://www.nytimes.com/interactive/2025/09/08/world/europe/ukraine-russia-war-drones-tanks-military.html>. Acesso em: 4 fev. 2026.

HOFFMAN, Frank. **Mars Adapting: Military Change During War**. La Vergne: Naval Institute Press, 2021.

HOFFMANN, Fabian R. The strategic-level effects of long-range strike weapons: A framework for analysis. *Journal of Strategic Studies*, v. 47, n. 6–7, p. 964–1000, 2024. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01402390.2024.2351500>. Acesso em: 17 jan. 2026.

HOLMBERG, Arita; ALVINIUS, Aida. How pressure for change challenge military organizational characteristics. *Defence Studies*, v. 19, n. 2, p. 130–148, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14702436.2019.1575698>. Acesso em: 12 jan. 2026.

HOROWITZ, Michael C.; PINDYCK, Shira. What is a military innovation and why it matters. *Journal of Strategic Studies*, v. 46, n. 1, p. 85–114, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01402390.2022.2038572>. Acesso em: 10 jan. 2026.

HOWARD, Michael. **War in European history**. Oxford: Oxford University Press, 2009.

INSIDE UNMANNED SYSTEMS. Ukraine Announces Formalization of New Unmanned Systems Forces Branch of Military. 2024. Disponível em: <https://insideunmannedsystems.com>. Acesso em: 13 jan. 2026.

JAJCAY, Jakub. I Fought in Ukraine and Here's Why FPV Drones Kind of Suck. *War on the Rocks*, June 26, 2025. <https://warontherocks.com/2025/06/i-fought-in-ukraine-and-heres-why-fpv-drones-kind-of-suck/>. Acesso em: 17 jan. 2026.

JENSEN, Benjamin M.; WHYTE, Christopher; CUOMO, Scott. **Information in war: military innovation, battle networks, and the future of artificial intelligence**. Washington, DC: Georgetown University Press, 2022.

JONES, Seth G.; MCCABE, Riley; PALMER, Alexander. Ukrainian Innovation in a War of Attrition. 2023. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/ukrainian-innovation-war-attrition>. Acesso em: 17 jan. 2026.

KING, Anthony. **The transformation of Europe's armed forces: from the Rhine to Afghanistan**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

KIRICHENKO, David. **Fibre-optic drones reshape Ukraine's technological war | Lowy Institute**. Disponível em: <https://www.lowyinstitute.org/the-interpreter/fibre-optic-drones-reshape-ukraine-s-technological-war>. Acesso em: 14 jan. 2026.

KNOX, MacGregor; MURRAY, Williamson (Ed.). **The Dynamics of Military Revolution: 1300–2050**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

KOZATSKYI, Sania. **FPV drones: weapons that changed the modern war**. Disponível em: <https://militaryni.com/en/articles/fpv-drones-weapons-that-changed-the-modern-war/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

KREPINEVICH, Andrew F. Cavalry to computer: the pattern of military revolutions. **The National Interest**, n. 37, p. 30-42, 1994. Disponível em: <https://nationalinterest.org/legacy/cavalry-to-computer-the-pattern-of-military-revolutions-848>. Acesso em 14 jan. 2026.

KREPINEVICH, Andrew F. **The origins of victory: how disruptive military innovation determines the fates of great powers**. New Haven (Conn.): Yale university press, 2023.

KREPS, Sarah E. **Drones: what everyone needs to know**. Oxford: Oxford University Press, 2016.

KREETZ, Tristan; LUCAS, Rebecca; PALICKA, Ondrej; et al. **Learning and remembering under fire: Proposals for a novel doctrinal system for Ukraine**. 2025. Disponível em: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA3833-1.html. Acesso em: 13 jan. 2026.

KUNERTOVA, Dominika. Drones have boots: Learning from Russia's war in Ukraine. *Contemporary Security Policy*, v. 44, n. 4, p. 576–591, 2023a. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13523260.2023.2262792>. Acesso em: 13 jan. 2026.

KUNERTOVA, Dominika. The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game. *Bulletin of the Atomic Scientists*, v. 79, n. 2, p. 95–102, 2023b. Disponível

em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00963402.2023.2178180>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MARTINS, Carlos. **Empresa brasileira apresenta o primeiro drone 100% nacional movido a jato**. Disponível em: <https://aeroin.net/empresa-brasileira-apresenta-o-primeiro-drone-100-nacional-movido-a-jato>. Acesso em: 15 jan. 2026.

MARTYANOV, Andrei. **The (Real) Revolution in Military Affairs**. Atlanta: Clarity Press, 2019.

MILITARYLAND. Unmanned Systems Forces of Ukraine. 2024. Disponível em: <https://militaryland.net>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MINISTRY OF DEFENCE OF UKRAINE. Drones and robotics for the Armed Forces of Ukraine: the Ministry of Defence is collaborating with members of parliament. 2024a. Disponível em: <https://mod.gov.ua>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MINISTRY OF DEFENCE OF UKRAINE. The Ministry of Defence has launched its own production of FPV drones. 2024b. Disponível em: <https://mod.gov.ua>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MINISTRY OF DEFENCE OF UKRAINE. Ukraine launches DOT-Chain Defence – a digital system for rapid delivery of weapons. 2024c. Disponível em: <https://mod.gov.ua>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MINISTRY OF DEFENCE OF UKRAINE. Ukraine and NATO join efforts to strengthen countermeasures against fiber-optic-controlled FPV drones. 2024d. Disponível em: <https://mod.gov.ua>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MINISTRY OF DEFENCE OF UKRAINE. New tools of warfare: FPV drones that guarantee the elimination of enemy targets. 2024e. Disponível em: <https://mod.gov.ua>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MINISTRY OF DEFENCE OF UKRAINE. Robots will fight at the front line – Lieutenant General Ivan Havryliuk. 2024f. Disponível em: <https://mod.gov.ua>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MITTAL, Vikram; GOETZ, John. A quantitative analysis of the effects of drone and counter-drone systems on the Russia-Ukraine battlefield. **Defense & Security Analysis**, v. 41, n. 3, p. 490–503, 2025. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14751798.2025.2479973>. Acesso em: 13 jan. 2026.

MURRAY, Williamson. **A necessidade de adaptação ao combate**. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 2020.

MURAVSKA, Julia. **Drones and defence innovation in Ukraine: consolidating wartime ingenuity**. King's College London, 29 nov. 2022. Disponível em: <https://www.kcl.ac.uk/drones-and-defence-innovation-in-ukraine-consolidating-wartime-ingenuity>. Acesso em: 13 jan. 2026.

NATO STANDARDIZATION OFFICE. **Minimum training requirements for unmanned aircraft systems (UAS) operators and pilots: ATP-3.3.8.1**. Edition B, Version 1. Brussels: NSO, 2019.

NIEDERKOFER, Mirko. Drones Win Battles, Components Win Wars. RUSI Commentary, London: *Royal United Services Institute*, Dec. 17, 2025. Disponível em: <https://www.rusi.orghttps://www.rusi.org>. Acesso em: 17 jan. 2026.

OLSEN, John Andreas (org.). **A history of air warfare**. Washington, DC: Potomac Books, 2010.

OSTAFIICHUCK, Daryna; BUDDEN, Phil; MURRAY, Fiona; et al. **Building & leveraging Ukraine's drone capabilities in conflict & beyond: Assessing the defense/security innovation ecosystem**. 2025. Disponível em: <https://www.researchgate.net/doi/10.13140/RG.2.2.31322.86722>. Acesso em: 13 jan. 2026.

POSEN, Barry R. **The Sources of Military Doctrine: France, Britain, and Germany Between the World Wars**. Ithaca: Cornell University Press, 1984.

RENIC, Neil; CHRISTENSEN, Johan. **Drones, the Russo-Ukrainian War, and the Future of Armed Conflict**. Copenhagen: Centre for Military Studies of Denmark, Djøf Publishing, 2024.

ROGERS, James Patton (org.). **De Gruyter handbook of drone warfare**. Berlin: De Gruyter, 2024.

ROSEN, Stephen Peter. **Winning the next war: innovation and the modern military**. Ithaca: Cornell University Press, 1991.

SAMPIERI, Roberto Hernández; COLLADO, Carlos Fernández; LUCIO, María del Pilar Baptista. **Metodologia de pesquisa**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

SCHARRE, Paul. **Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War**. New York: W. W. Norton & Company, 2018.

SCHARRE, Paul. **Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War**. New York: W. W. Norton & Company, 2018.

SOETERS, Joseph; WINSLOW, Donna; WEDEEN, Jessica. Military culture. In: CAFORIO, Giuseppe (org.). **Handbook of the sociology of the military**. Nova York: Springer, 2006. p. 237–254.

SOLLFRANK, Alexander; BOEKE, Sergei. Enablement and Logistics as Critical Success Factors for Military Operations: Comparing Russian and NATO Approaches. *The RUSI Journal*, v. 169, n. 7, p. 10-22, 2024. Disponível em: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/rusi-journal/enablement-and-logistics-military-operations-comparing-russia-and-nato>. Acesso em: 17 jan. 2026.

SOTOUDEHFAR, Saba; SARKIN, Jeremy Julian; CHAARI, Mohamed Zied. Cheap drones, costly consequences: the legal and humanitarian risks and outcomes of low-tech drone warfare. *Defense & Security Analysis*. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14751798.2025.2546712>. Acesso em: 17 jan. 2026.

SLOAN, Elinor C. **Military transformation and modern warfare: a reference handbook**. Westport: Praeger Security International, 2008.

SLUSHER, Matthew N. Lessons from the Ukraine Conflict: Modern Warfare in the Age of Autonomy, Information, and Resilience. Washington, D.C.: *Center for Strategic and International Studies (CSIS)*, 2025. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/lessons-ukraine-conflict-modern-warfare-age-autonomy-information-and-resilience>. Acesso em: 17 jan. 2026.

TEIXEIRA JÚNIOR, Augusto W.M.; SANTOS, Maria Mont’Serrat; GOMES, Cinthya Araújo. Artilharia, drones e mísseis na guerra russo-ucraniana. In: SILVA, Marcelo Gurgel do Amaral; FILHO, Oscar Medeiros; TEIXEIRA JÚNIOR, Augusto W.M. (Orgs.). **O que aprendemos com a guerra na Ucrânia**. Brasília, DF: Escola Superior De Defesa, 2025.

TERHORST, Linus. Theorising Military Innovation’s Emergence and Effectiveness Across Innovation Timelines. *European Review of International Studies*, p. 1-24, 2025. Disponível em: https://brill.com/view/journals/eris/11/3/article-p415_005.xml?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article. Acesso em: 17 jan. 2026.

USACHOVA, Olga. Play for Ukraine : wargaming as a resistance pleasure. *Culture, Theory and Critique*, v. 64, n. 1–2, p. 179–195, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14735784.2024.2379814>. Acesso em: 17 jan. 2026.

VAN EVERA, Stephen. **Guide to methods for students of political science**. Ithaca: Cornell University Press, 1997.

WATLING, Jack. **The Arms of the Future: Technology and Close Combat in the Twenty-First Century**. Londres: Bloomsbury Academic, 2023.

WATLING, Jack; REYNOLDS, Nick. **Meatgrinder: Russian Tactics in the Second Year of Its Invasion of Ukraine**. Special Report. Londres: Royal United Services Institute (RUSI), May 2023. Disponível em: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/special-resources/meatgrinder-russian-tactics-second-year-its-invasion-ukraine>. Acesso em: 17 jan. 2026.

WATLING, Jack; REYNOLDS, Nick. **Tactical Developments During the Third Year of the Russo-Ukrainian War**. Londres: Royal United Services Institute (RUSI), Feb. 2025. Disponível em: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/special-resources/tactical-developments-during-third-year-russo-ukrainian-war>. Acesso em: 17 jan. 2026.

GONCHARUK, Vitaliy. **Ukraine Isn’t the Model for Winning the Innovation War**. 2025 War on the Rocks. Disponível em: <https://warontherocks.com/2025/08/ukraine-isnt-the-model-for-winning-the-innovation-war/>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ZABRODSKYI, Mykhaylo et al. **Preliminary Lessons in Conventional Warfighting from Russia’s Invasion of Ukraine**. February–July 2022. Special Report. Londres: Royal United Services Institute (RUSI), Nov. 2022. Disponível em: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/special-resources/preliminary-lessons-conventional-warfighting-russias-invasion-ukraine-february-july-2022>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ZALUZHNYI, Valerii. **Modern positional warfare and how to win in it.** The Economist, London, 1 nov. 2023. Disponível em: <https://nsarchive.gwu.edu/document/32129-24-zaluzhny-modern-positional-warfare-and-how-win-i-t-economist-website>. Acesso em: 17 jan. 2026.

ZWEIBELSON, Ben. **Understanding the Military Design Movement: War, Change and Innovation.** Londres: Routledge, 2023.