UFSM

InterAção

ISSN 2357-7975
ACESSO ABERTO

IA., Santa Maria, v. 17, n. 3, e97899, p. 1-32, 2026 • https://dx.doi.org/10.5902/2357797597899
Submissão: 24/07/2026 • Aprovação: 14/09/2026 • Publicação: 02/10/2026

Artigos Dossiê

Arquitetura dual com HAPS para defesa, segurança e soberania na Amazônia

Dual-Use Architecture with HAPS for defense, security, and sovereignty in the Amazon

Manoel Fernandes Amaral Filho[I]
Edison Pignaton de Freitas[II]
Bruno Costa Marinho[III]

[I]Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil
[II]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
[III]Instituto de Pesquisas do Exército na Amazônia, Manaus, AM, Brasil

Resumo

A Amazônia apresenta desafios singulares relacionados à vigilância territorial, ao monitoramento ambiental, à conectividade e à proteção de infraestruturas críticas, exigindo soluções tecnológicas capazes de atender simultaneamente a demandas civis e militares. Neste contexto, o presente artigo analisa o potencial das plataformas estratosféricas de alta altitude (High Altitude Platform Stations – HAPS) como infraestrutura de uso dual para Defesa, segurança e desenvolvimento na Amazônia. A pesquisa adota abordagem qualitativa, baseada em revisão narrativa estruturada da literatura e análise documental de normas técnicas, instrumentos regulatórios e mecanismos de fomento nacionais e internacionais. Os resultados indicam que a integração entre HAPS, satélites de órbita baixa (LEO), sensoriamento distribuído, inteligência artificial embarcada e criptografia pós-quântica constitui uma arquitetura tecnologicamente consistente para ampliar capacidades de monitoramento, comunicações resilientes e processamento distribuído de dados. Além disso, evidenciam que a convergência entre instrumentos de fomento, Base Industrial de Defesa e o ambiente de inovação da Zona Franca de Manaus cria condições favoráveis ao desenvolvimento nacional dessa capacidade. Conclui-se que plataformas HAPS apresentam potencial para consolidar uma infraestrutura estratégica de uso dual, contribuindo simultaneamente para a soberania tecnológica, a proteção da Amazônia e o desenvolvimento regional.

Palavras-chave: HAPS; Amazônia; Tecnologias de uso dual; Defesa; Soberania tecnológica

Artigo publicado por InterAção sob uma licença CC BY-NC-SA 4.0.

Abstract

The Amazon faces unique challenges related to territorial surveillance, environmental monitoring, connectivity, and the protection of critical infrastructure, requiring technological solutions capable of simultaneously addressing civilian and military demands. In this context, this paper analyzes the potential of High Altitude Platform Stations (HAPS) as a dual-use infrastructure for defense, security, and regional development in the Amazon. The research adopts a qualitative approach based on a structured narrative literature review and documentary analysis of technical standards, regulatory frameworks, and national and international innovation support mechanisms. The results indicate that the integration of HAPS, Low Earth Orbit (LEO) satellites, distributed sensing, onboard artificial intelligence, and post-quantum cryptography provides a technologically consistent architecture for enhancing environmental monitoring, resilient communications, and distributed data processing. Furthermore, the study shows that the convergence of innovation funding mechanisms, the Brazilian Defense Industrial Base, and the innovation ecosystem of the Manaus Free Trade Zone creates favorable conditions for developing this capability domestically. It is concluded that HAPS can become a strategic dual-use infrastructure, contributing simultaneously to technological sovereignty, Amazon protection, and sustainable regional development.

Keywords: HAPS; Amazon; Dual-use technologies; Defense; Technological sovereignty

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia reúne características que dificilmente coexistem em outra região do planeta. Além de desempenhar papel essencial para a regulação climática global, constitui um espaço geopolítico de elevada relevância estratégica, marcado por recorrentes debates sobre soberania e internacionalização. Ao mesmo tempo, abriga extensa faixa de fronteira terrestre, onde a presença do Estado enfrenta desafios decorrentes da dimensão territorial e das limitações de infraestrutura, e concentra um dos mais importantes polos industriais do País, organizado em torno do modelo da Zona Franca de Manaus. A Amazônia Legal brasileira ocupa 5.015.068,18 km², correspondentes a 58,9% do território nacional, distribuídos por 772 municípios. Desses, 588 localizam-se na faixa de fronteira, sendo 432 integralmente inseridos nessa região. Além disso, aproximadamente dois terços dos cerca de 16.880 km da fronteira brasileira com sete países, Guiana Francesa, Suriname, Guiana, Venezuela, Colômbia, Peru e Bolívia, situam-se na Região Norte, com destaque para os estados do Amazonas e do Acre (IBGE, 2020; 2024).

Esse contexto evidencia um desafio estrutural para a atuação do Estado. A vigilância territorial, o monitoramento ambiental, a proteção das fronteiras e a resposta a eventos críticos, como desmatamento, garimpo ilegal, queimadas, tráfico transnacional, desastres naturais e emergências de saúde pública, dependem de infraestrutura de conectividade e de sensoriamento ainda insuficiente em grande parte da região. Levantamento da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) indica que 1.207 municípios brasileiros permanecem sem atendimento por fibra óptica, concentrados principalmente nas regiões Norte e Nordeste. Como consequência, sistemas de comunicação por satélites de órbita baixa já atendem 743 dos 772 municípios da Amazônia Legal, o equivalente a 96% do total, evidenciando não apenas a elevada demanda por conectividade, mas também a atual dependência de provedores estrangeiros para uma capacidade considerada estratégica (ANATEL, 2025).

Diversas tecnologias têm sido empregadas para reduzir essas limitações de conectividade e ampliar as capacidades de monitoramento da Amazônia. Satélites de órbita baixa (LEO) ampliaram significativamente o acesso à comunicação em áreas remotas, reduzindo custos e aumentando a disponibilidade de serviços. Entretanto, ainda apresentam limitações relacionadas à latência, à capacidade de processamento embarcado e à permanência sobre uma mesma área de interesse. De forma semelhante, veículos aéreos não tripulados e aeronaves tripuladas oferecem elevada resolução espacial e flexibilidade operacional, porém possuem autonomia limitada e custos de operação relativamente elevados. Entre essas duas camadas, espacial e aérea tática, a literatura recente identifica uma alternativa promissora: as plataformas de alta altitude (*High Altitude Platform Stations – HAPS*), sistemas capazes de operar na estratosfera, tipicamente entre 20 e 50 km de altitude, conforme definição do Regulamento de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-RR), oferecendo cobertura regional persistente, elevada autonomia e potencial para atuar como plataforma de sensoriamento, comunicação e computação de borda (ITU, 2023).

A escolha da Amazônia como ambiente de análise não decorre apenas de sua relevância geopolítica, mas de uma opção metodológica. A região reúne um conjunto singular de desafios técnicos que dificilmente coexistem em outros cenários: intensa atividade convectiva, elevada umidade, dossel florestal contínuo, grandes distâncias logísticas, baixa densidade populacional e escassez de infraestrutura terrestre de comunicações. Essas características impõem restrições simultâneas aos sistemas de sensoriamento, às redes de comunicações e à manutenção de equipamentos em campo. Sob essa perspectiva, a Amazônia constitui um ambiente natural de validação para arquiteturas tecnológicas complexas. Uma solução baseada na integração entre HAPS, satélites LEO e sensores distribuídos, que demonstre robustez operacional nessas condições, tende a apresentar elevada capacidade de adaptação a outros ambientes geográficos com requisitos menos severos.

Nesse contexto, este artigo parte da premissa de que plataformas HAPS não devem ser compreendidas apenas como uma solução para ampliação da conectividade em áreas remotas. Defende-se que essas plataformas podem constituir uma infraestrutura estratégica de uso dual, integrando comunicações, sensoriamento remoto, processamento distribuído de dados e apoio à tomada de decisão em aplicações civis e militares. Sob essa perspectiva, propõe-se analisar o potencial da Amazônia como ambiente de validação de uma arquitetura baseada na integração entre HAPS, satélites LEO, sensores distribuídos, inteligência artificial e criptografia pós-quântica, capaz de atender simultaneamente às demandas de Defesa, segurança, proteção ambiental, desenvolvimento regional e soberania tecnológica.

Diante desse contexto, busca-se responder à seguinte questão de pesquisa: como plataformas HAPS, integradas a satélites LEO, sensores distribuídos, inteligência artificial e criptografia pós-quântica, podem constituir uma arquitetura dual de Defesa e segurança para a Amazônia, compatível simultaneamente com demandas militares, civis, ambientais, industriais, regulatórias e geoeconômicas do Sul Global?

Parte-se da hipótese de que a adoção de HAPS como infraestrutura dual na Amazônia pode reduzir lacunas históricas de presença estatal, conectividade, vigilância e resposta a eventos críticos, ao mesmo tempo em que estrutura uma agenda de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) e fortalece a produção industrial regional, especialmente no contexto da Zona Franca de Manaus, desde que sejam equacionados os desafios tecnológicos e regulatórios associados à sua operação.

O presente artigo tem por objetivo analisar o potencial dos HAPS como infraestrutura dual de Defesa, segurança e desenvolvimento na Amazônia, articulando evidências da literatura científica, experiências internacionais, o arcabouço regulatório aplicável e os instrumentos de fomento à inovação voltados a tecnologias de uso dual. Para alcançar esse objetivo, a pesquisa busca:

a. Mapear o estado da arte sobre HAPS, integração HAPS-LEO, redes não terrestres (NTN), computação de borda estratosférica, Internet das Coisas de Batalha (IoBT), sensoriamento remoto, IA embarcada e criptografia pós-quântica aplicada a comunicações críticas, mediante protocolo explícito de revisão.

b. Comparar experiências internacionais de organização de agendas de inovação em Defesa baseadas em tecnologias disruptivas com a realidade brasileira e amazônica.

c. Identificar aplicações militares e civis de HAPS na Amazônia, fundamentadas em dados quantitativos territoriais e de conectividade.

d. Examinar, de forma transversal, a convergência entre mecanismos de fomento nacionais e internacionais, diretos e indiretos, historicamente voltados a tecnologias de uso dual, sem vinculação a um instrumento específico.

e. Examinar o arcabouço regulatório aeronáutico e de espectro aplicável (ITU, ANAC, DECEA) e suas implicações para a operação de HAPS na Amazônia.

f. Apresentar estimativas preliminares de custo (CAPEX/OPEX) e discutir a viabilidade econômica da arquitetura proposta.

g. Demonstrar a função geoeconômica potencial da Zona Franca de Manaus na

produção, integração, manutenção e exportação de soluções de uso dual.

Para responder à questão de pesquisa proposta, o artigo encontra-se estruturado em quatro seções principais, além desta introdução. Inicialmente, apresenta-se o referencial teórico, abordando os fundamentos conceituais relacionados às plataformas HAPS, às tecnologias de uso dual, às arquiteturas de comunicação e sensoriamento e aos aspectos regulatórios aplicáveis. Em seguida, descrevem-se os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa. Na sequência, são apresentados e discutidos os resultados, contemplando o estado da arte das tecnologias analisadas, as experiências internacionais, as aplicações potenciais na Amazônia, o ambiente regulatório, os mecanismos de fomento e a viabilidade técnico-econômica da arquitetura proposta. Por fim, são apresentadas as considerações finais, destacando as principais contribuições do estudo, suas limitações e oportunidades para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HAPS como infraestrutura estratégica para o Sul Global

Países do Sul Global enfrentam limitações estruturais no acesso a infraestrutura espacial, sensores avançados e capacidade de processamento distribuído, em contraste com economias que dispõem de constelações próprias de satélites, cadeias industriais consolidadas e programas permanentes de inovação em Defesa. Essa assimetria extrapola o campo estritamente militar. Em regiões como a Amazônia, desafios relacionados à vigilância territorial, proteção de fronteiras, monitoramento ambiental, conectividade de populações isoladas, proteção de infraestruturas críticas e resposta a desastres dependem, simultaneamente, de capacidades de sensoriamento, comunicação e processamento de dados.

Nesse contexto, o conceito de soberania tecnológica ultrapassa a simples aquisição de equipamentos. Trata-se da capacidade de operar, manter, adaptar e,

progressivamente, desenvolver tecnologias consideradas estratégicas, reduzindo dependências externas em funções críticas para o Estado. Essa perspectiva aproxima as agendas de Defesa, desenvolvimento industrial e inovação, conferindo às plataformas de alta altitude (High Altitude Platform Stations – HAPS) relevância crescente como infraestrutura tecnológica de uso dual.

Diferentemente de soluções concebidas exclusivamente para aplicações militares ou civis, os HAPS apresentam potencial para atender simultaneamente demandas de segurança pública, Defesa, monitoramento ambiental, conectividade, proteção de infraestruturas críticas e apoio a operações humanitárias. Essa característica aproxima essas plataformas do conceito contemporâneo de tecnologias de uso dual, cuja importância tem sido crescente nas políticas nacionais de inovação e nas estratégias de desenvolvimento tecnológico de diversos países.

2.2 Estado da Arte: HAPS, NTN e Integração HAPS–LEO

O desenvolvimento das Redes Não Terrestres (Non-Terrestrial Networks – NTN) representa uma das principais tendências da evolução das telecomunicações. Essas arquiteturas integram diferentes camadas de infraestrutura, combinando satélites, plataformas estratosféricas, veículos aéreos e redes terrestres em sistemas capazes de ampliar cobertura, disponibilidade e resiliência das comunicações.

Nesse cenário, os HAPS ocupam posição intermediária entre satélites de órbita baixa (LEO) e a infraestrutura terrestre convencional. Operando na estratosfera, oferecem cobertura regional persistente, menor latência que sistemas exclusivamente espaciais e maior flexibilidade operacional quando comparados a satélites. Além disso, podem ser reposicionados conforme a necessidade operacional, característica particularmente relevante para regiões extensas e de baixa infraestrutura, como a Amazônia.

Essa arquitetura encontra sólido respaldo na literatura recente. Karabulut Kurt *et al*. (2021) consolidam os fundamentos das redes HAPS, descrevendo sua

arquitetura, aplicações e desafios técnicos, enquanto Euler, Tejedor e Obregon (2022) apresentam sua integração com redes móveis por meio do conceito de HAPS as IMT Base Stations (HIBS). Alam *et al.* (2021) demonstram o emprego dessas plataformas como macroestações-base capazes de ampliar significativamente a cobertura de sistemas de comunicação.

A evolução das NTN também impulsionou pesquisas sobre arquiteturas integradas entre HAPS, satélites LEO e redes terrestres. Cao *et al.* (2018) anteciparam diversos dos desafios atualmente discutidos para redes aerotransportadas, enquanto Toka *et al.* (2024) analisam a integração entre LEO, HAPS e veículos aéreos não tripulados como elemento estruturante das futuras redes 6G. Complementarmente, Abbasi e Yanikomeroglu (2024) investigam soluções de backhaul em frequências sub-terahertz e arquiteturas massivas de antenas para ampliação da capacidade dessas redes.

Mais recentemente, observa-se uma mudança de paradigma na literatura. Os HAPS deixam de ser tratados apenas como plataformas de comunicação para assumir funções adicionais de processamento distribuído, computação de borda, integração de sensores e apoio ao sensoriamento remoto. Entre as principais linhas de pesquisa destacam-se a integração HAPS–LEO, a computação de borda estratosférica, o processamento embarcado de modelos de inteligência artificial, a agregação de dados provenientes de sensores IoT distribuídos, comunicações ópticas em espaço livre (FSO), *beamforming* adaptativo e comunicações resilientes em ambientes com baixa infraestrutura terrestre.

Apesar desse avanço, observa-se que a maior parte dos estudos se concentra em aspectos tecnológicos específicos, como desempenho de enlaces, arquitetura de redes ou posicionamento das plataformas. Permanecem relativamente escassos os trabalhos que analisam os HAPS sob uma perspectiva sistêmica, integrando simultaneamente Defesa, segurança pública, proteção ambiental, desenvolvimento industrial e soberania tecnológica, lacuna que este artigo busca explorar.

2.3 Comunicações Seguras Pós-Quânticas em Arquiteturas HAPS–LEO

A integração entre HAPS, satélites LEO e sensores distribuídos pressupõe a transmissão contínua de informações sensíveis relacionadas à Defesa, ao monitoramento ambiental e à proteção de infraestruturas críticas. Nesse contexto, a segurança das comunicações deixa de representar apenas um requisito operacional e passa a constituir elemento essencial da soberania tecnológica.

A crescente perspectiva de utilização de computadores quânticos capazes de comprometer algoritmos criptográficos atualmente empregados torna necessária a adoção de mecanismos de criptografia pós-quântica (*Post-Quantum Cryptography – PQC*). Essa necessidade torna-se ainda mais relevante em plataformas de longa permanência operacional, como HAPS e satélites, cujo ciclo de vida pode alcançar vários anos, dificultando alterações posteriores dos protocolos criptográficos embarcados. Conforme destacam Del Moral *et al.* (2024), essa característica expõe dados estratégicos ao risco conhecido como *harvest now, decrypt later*, no qual informações capturadas atualmente poderão ser descriptografadas futuramente, mediante computadores quânticos suficientemente poderosos.

Em resposta a esse cenário, o National Institute of Standards and Technology (NIST) publicou, em 2024, os padrões federais FIPS 203, FIPS 204 e FIPS 205 (NIST, 2024a; 2024b; 2024c), estabelecendo algoritmos de encapsulamento de chaves e assinaturas digitais resistentes a ataques quânticos. Paralelamente, a National Security Agency (NSA), por meio da Commercial National Security Algorithm Suite 2.0 (CNSA 2.0), estabeleceu cronograma para migração dos sistemas de segurança nacional até 2030 (NSA, 2022).

Sob a perspectiva da arquitetura proposta neste artigo, esses avanços indicam que mecanismos de criptografia pós-quântica devem ser incorporados desde a concepção das redes HAPS–LEO, especialmente nos enlaces destinados à transmissão de dados de sensoriamento, telemetria, comando e controle e proteção de

infraestruturas críticas. Dessa forma, a segurança cibernética deixa de constituir um componente acessório da arquitetura para assumir papel estruturante na construção de uma infraestrutura dual destinada à Amazônia.

Nesse sentido, a incorporação de mecanismos de criptografia pós-quântica nas redes HAPS-LEO constitui não apenas um requisito técnico operacional, mas um elemento essencial de soberania digital. Ao depender de protocolos criptográficos clássicos, baseados em problemas matemáticos vulneráveis a ataques quânticos, em infraestruturas fornecidas ou controladas por terceiros externos, o Estado reduz sua capacidade de garantir a confidencialidade e a integridade das comunicações estratégicas sobre o território amazônico. A adoção de algoritmos padronizados pelo NIST, ML-KEM para estabelecimento de chaves e ML-DSA para autenticação de telemetria e comandos de controle, em plataformas concebidas e integradas no âmbito da Base Industrial de Defesa nacional constitui, portanto, vetor direto de fortalecimento da soberania digital, condição necessária para que a arquitetura HAPS proposta cumpra plenamente sua função estratégica. Estudos de desempenho de algoritmos pós-quânticos em dispositivos com restrições computacionais, como os embarcados em plataformas aeroespaciais, demonstram a viabilidade técnica dessa implementação, ainda que com sobrecarga mensurável de processamento e largura de banda que deve ser incorporada ao dimensionamento dos enlaces HAPS-LEO (Fitzgibbon; Ottaviani, 2024).

3 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória, desenvolvida por meio de revisão narrativa estruturada da literatura, complementada por análise documental de normas técnicas, documentos institucionais e instrumentos regulatórios nacionais e internacionais. A opção por esse delineamento decorre da natureza interdisciplinar do objeto de pesquisa, que integra conhecimentos das áreas de telecomunicações, engenharia aeroespacial,

Defesa, segurança, geopolítica, política industrial e inovação tecnológica. Nesse contexto, a revisão narrativa estruturada mostrou-se mais adequada do que uma revisão sistemática, por permitir a integração de diferentes perspectivas analíticas sem comprometer a transparência quanto aos procedimentos empregados na seleção das fontes.

A revisão bibliográfica foi realizada nas bases Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ACM Digital Library, SpringerLink e ScienceDirect, complementadas por documentos oficiais publicados por organismos nacionais e internacionais, dentre os quais se destacam a International Telecommunication Union (ITU), o National Institute of Standards and Technology (NIST), a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a National Security Agency (NSA) e demais instituições responsáveis pela regulamentação e padronização das tecnologias analisadas.

Foram considerados, prioritariamente, trabalhos publicados entre 2018 e 2026, período correspondente à consolidação das pesquisas relacionadas às Redes Não Terrestres (Non-Terrestrial Networks – NTN), às plataformas HAPS, à integração HAPS-LEO, às redes 5G/6G, à computação de borda e à criptografia pós-quântica. Excepcionalmente, foram incorporadas referências anteriores, quando indispensáveis à compreensão da evolução do arcabouço regulatório, da padronização tecnológica ou do desenvolvimento histórico das plataformas analisadas.

A seleção das referências observou os seguintes critérios de inclusão: artigos científicos publicados em periódicos ou anais de eventos com revisão por pares, indexados nas bases consultadas, que abordassem diretamente plataformas HAPS, redes NTN, integração HAPS-LEO, sensoriamento remoto, computação de borda, Internet das Coisas, inteligência artificial embarcada, criptografia pós-quântica ou aplicações dessas tecnologias nos domínios da Defesa, segurança, monitoramento ambiental e infraestrutura crítica. Também foram incluídos documentos técnicos e regulatórios produzidos por organismos nacionais e internacionais de reconhecida autoridade.

Foram excluídos materiais promocionais de fabricantes, documentos sem autoria identificável, publicações sem revisão por pares e preprints que não possuíssem versão posteriormente publicada em periódico ou evento científico indexado. Nos casos em que uma versão revisada por pares foi localizada, esta foi utilizada como referência principal.

As estratégias de busca empregaram combinações de descritores em português e inglês relacionados aos principais conceitos investigados, incluindo *High Altitude Platform Stations (HAPS)*, *Non-Terrestrial Networks (NTN)*, *Low Earth Orbit (LEO)*, *edge computing*, *remote sensing*, *Internet of Battlefield Things (IoBT)*, *Internet of Military Things (IoMT)*, *post-quantum cryptography*, *6G*, *dual-use technologies*, *Amazon* e *Amazon rainforest*. As expressões de busca foram refinadas iterativamente ao longo da pesquisa, priorizando trabalhos de maior impacto científico e documentos técnicos de organismos responsáveis pela regulamentação e padronização das tecnologias analisadas.

Os documentos e publicações selecionados foram analisados de forma integrada, buscando identificar os principais componentes tecnológicos, regulatórios, operacionais, econômicos e institucionais relacionados ao emprego de plataformas HAPS. A partir dessa análise, foi construída uma proposta conceitual de arquitetura dual para a Amazônia, articulando evidências da literatura científica, experiências internacionais, instrumentos regulatórios e mecanismos de fomento à inovação. A arquitetura apresentada não constitui um projeto executivo nem um modelo validado experimentalmente, mas uma síntese analítica destinada a discutir a viabilidade técnica, regulatória, econômica e estratégica da utilização de plataformas HAPS como infraestrutura dual para Defesa, segurança, conectividade e desenvolvimento regional.

Como procedimento auxiliar, foi utilizada ferramenta de inteligência artificial generativa exclusivamente para apoio à revisão linguística, organização textual, padronização das referências bibliográficas e aperfeiçoamento da clareza redacional. A seleção das fontes, a interpretação da literatura, a análise dos documentos, a construção da arquitetura proposta e todas as conclusões apresentadas permaneceram sob responsabilidade exclusiva dos autores.

4 RESULTADOS

4.1 Experiências internacionais e lições para o Brasil

Programas de inovação em Defesa implementados em diferentes continentes evidenciam uma tendência convergente de priorização de tecnologias disruptivas capazes de atender, simultaneamente, a demandas civis e militares. Inteligência artificial aplicada a operações militares, sistemas autônomos, plataformas HAPS, Internet das Coisas de Batalha (IoBT), redes definidas por software, comunicações resilientes, fusão multissensorial e navegação em ambientes com degradação ou negação de *Global Navigation Satellite System* (GNSS) passaram a integrar agendas estratégicas de investimento público em diversos países.

No campo específico da Internet das Coisas de Batalha, observa-se uma evolução conceitual consistente em direção à integração de sensores, plataformas não tripuladas, sistemas vestíveis e centros de comando em arquiteturas distribuídas de processamento e tomada de decisão em tempo real. A literatura identifica desafios relacionados à segurança cibernética, interoperabilidade, compartilhamento de dados e computação de borda, além de destacar a crescente utilização dessas arquiteturas em sistemas de defesa aérea, monitoramento de fronteiras e operações multidomínio (Wigness *et al.*, 2022; Agadakos *et al.*, 2019; Strayern *et al.*, 2022; Michalski; Bernat, 2019; Li *et al.*, 2020).

Essa evolução tecnológica vem sendo acompanhada por mudanças igualmente relevantes nos instrumentos de política pública. Em diferentes regiões do mundo, mecanismos de fomento passaram a reconhecer formalmente tecnologias de uso dual como áreas prioritárias de investimento, combinando instrumentos diretos, como subvenções econômicas e financiamentos não reembolsáveis, com mecanismos indiretos, incluindo incentivos fiscais, reservas de mercado e políticas de conteúdo local.

Na Europa, o European Defence Fund realiza chamadas voltadas ao desenvolvimento de tecnologias disruptivas com potencial de aplicação dual,

estimulando a formação de consórcios entre empresas, universidades e centros de pesquisa (European Comission, 2024). Nos Estados Unidos, a Defense Innovation Unit atua como mecanismo permanente de aproximação entre tecnologias originalmente desenvolvidas para o mercado civil e aplicações de interesse da Defesa, reduzindo barreiras à incorporação de soluções inovadoras pelo Departamento de Defesa (U.S. Department of Defense, 2024). Iniciativas semelhantes também vêm sendo observadas em países da Ásia-Pacífico e da Oceania, indicando que o fortalecimento de ecossistemas de tecnologias de uso dual constitui uma tendência internacional consolidada.

Esses exemplos não devem ser compreendidos como modelos a serem reproduzidos integralmente, mas como evidências de que diferentes países têm estruturado políticas públicas específicas para acelerar o desenvolvimento de capacidades tecnológicas estratégicas. Em todos os casos analisados, observa-se a combinação entre financiamento de longo prazo, integração entre governo, academia e indústria e fortalecimento das bases industriais nacionais.

Sob essa perspectiva, o principal desafio brasileiro não consiste em replicar experiências internacionais, mas em desenvolver uma trajetória própria, compatível com suas características territoriais, industriais e institucionais. A Amazônia apresenta condições particularmente favoráveis para essa estratégia. Com mais de cinco milhões de quilômetros quadrados, dimensão superior à de qualquer país europeu individual, a região reúne simultaneamente desafios operacionais, demanda por conectividade, necessidade de monitoramento contínuo e um parque industrial consolidado na Zona Franca de Manaus. A integração desses elementos oferece condições para o desenvolvimento de uma arquitetura nacional baseada em plataformas HAPS, articulando capacidades civis e militares e fortalecendo a soberania tecnológica brasileira.

4.2 Aplicações Duais de HAPS na Amazônia

A análise da literatura evidencia que o emprego de plataformas HAPS na Amazônia possui potencial para extrapolar significativamente a função tradicional de ampliação da conectividade. A integração entre sensoriamento remoto, inteligência artificial, comunicações resilientes e processamento distribuído permite que essas plataformas atuem como infraestrutura estratégica de uso dual, atendendo simultaneamente às necessidades de Defesa, segurança pública, proteção ambiental e desenvolvimento regional.

Essa conclusão encontra respaldo na evolução dos sistemas de monitoramento ambiental já empregados na Amazônia. O Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES) e o Programa de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), ambos operados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), demonstram que o aumento da frequência de aquisição e processamento de imagens reduz significativamente o tempo de resposta das ações de fiscalização ambiental. Enquanto o PRODES foi concebido para estimativas anuais de desmatamento, o DETER incorporou imagens de maior frequência temporal, permitindo a emissão de alertas, inicialmente em poucos dias e, posteriormente, em intervalos inferiores a vinte e quatro horas (INPE, 2024). Estudos posteriores demonstraram que essa redução no tempo de disponibilização da informação produziu benefícios econômicos e ambientais mensuráveis para o combate ao desmatamento (Mullan *et al.*, 2023).

Resultados semelhantes também foram observados em escala local. Slough, Kopas e Urpelainen (2018) demonstraram que comunidades indígenas da Amazônia peruana, equipadas com sistemas de sensoriamento remoto, comunicação via satélite e alertas geoespaciais, reduziram o desmatamento em 52% no primeiro ano e 21% no segundo ano de monitoramento, evidenciando que a disponibilidade de informações em tempo oportuno constitui fator determinante para aumentar a capacidade de resposta frente a ilícitos ambientais.

Paralelamente, os avanços recentes em inteligência artificial ampliaram significativamente o potencial dessas aplicações. Técnicas de aprendizado profundo aplicadas à fusão de imagens ópticas e radar de abertura sintética (SAR) vêm aumentando a precisão da detecção automática de mudanças na cobertura florestal, mesmo sob elevada cobertura de nuvens, condição típica da Amazônia. Essas soluções criam condições para que parte do processamento seja realizada diretamente em plataformas HAPS, reduzindo a necessidade de transmissão contínua de grandes volumes de dados para centros de processamento em solo (Tovar; Adarme; Feitosa, 2021; Lee; Choi, 2023).

É relevante destacar que a cobertura proporcionada por uma única plataforma HAPS, cujo raio de cobertura pode alcançar várias centenas de quilômetros a partir da estratosfera, permite que as aplicações duais identificadas sejam operacionalizadas em escala regional, abrangendo simultaneamente múltiplos municípios, bacias hidrográficas e faixas de fronteira. Essa característica é particularmente significativa para a Amazônia Legal, cujas dimensões, 5.015.068 km² distribuídos por 772 municípios, inviabilizam soluções baseadas exclusivamente em infraestrutura terrestre ou em aeronaves de curto raio de ação. O caráter dual, portanto, não se aplica pontualmente a localidades específicas, mas ao território amazônico como um todo, tornando os HAPS uma tecnologia estruturalmente coerente com os desafios de presença, monitoramento e resposta que caracterizam toda a região. Estudos de monitoramento de base comunitária com alertas de desmatamento confirmam, adicionalmente, que a disponibilidade de informações de sensoriamento gerou efeitos positivos mensuráveis sobre a proteção de territórios amazônicos distintos (Cappello *et al.*, 2022; Giordani; Zorzi, 2021), indicando a replicabilidade dessas abordagens em toda a extensão da Amazônia Legal brasileira.

Sob essa perspectiva, a principal contribuição deste trabalho consiste em integrar essas capacidades tecnológicas em uma arquitetura única de uso dual. A análise realizada permitiu identificar quinze domínios de aplicação nos quais plataformas HAPS podem gerar benefícios simultâneos para usuários civis e militares, conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1 — Matriz de Aplicações Duais de HAPS na Amazônia

Domínio	Aplicação Militar	Aplicação Civil	Tecnologias Habilitadoras
Vigilância de fronteiras (588 municípios na faixa de fronteira)	Monitoramento de faixa de fronteira, detecção de incursões	Controle migratório, fiscalização aduaneira	Sensores EO/IR/SAR, IA embarcada
Monitoramento ambiental	Apoio a operações de proteção de áreas sensíveis	Detecção de desmatamento e queimadas (PRODES/DETER)	Sensoriamento multiespectral, SAR
Combate a ilícitos transnacionais	Apoio a operações interagências contra garimpo e narcotráfico	Fiscalização ambiental e tributária	IA para detecção de padrões, comunicações seguras
Proteção de infraestrutura crítica	Vigilância de instalações estratégicas	Monitoramento de barragens e redes de energia	Sensores IoT, criptografia pós-quântica (ML-KEM/ML-DSA)
Comunicações em áreas remotas (1.207 municípios sem fibra)	Redes táticas para tropas isoladas	Conectividade de comunidades ribeirinhas e indígenas	SDN/DTN/ICN, NTN
Defesa civil e resposta a desastres	Apoio logístico a operações de emergência	Coordenação de resgate e ajuda humanitária	Comunicações resilientes, PNT augmentation
Telemedicina e saúde operacional	Suporte médico remoto a tropas	Telemedicina para populações isoladas	Backhaul de baixa latência
Logística fluvial e terrestre	Rastreamento de comboios e embarcações	Otimização de cadeias logísticas regionais	IoT, sensoriamento de posição
Bioeconomia e cadeias produtivas	—	Monitoramento de cadeias produtivas sustentáveis	Sensoriamento remoto, IA
Segurança de eventos e grandes operações	Apoio a operações de grande porte	Segurança pública em eventos	Comunicações resilientes
Mineração legal e combate à ilegal	Apoio a operações de repressão	Fiscalização de áreas de concessão	SAR, IA de detecção
Consciência situacional fluvial	Monitoramento de tráfego fluvial sensível	Segurança da navegação	Sensores, fusão multissensorial
Apoio a operações interagências	Integração de dados entre forças	Integração de dados entre órgãos civis	Plataformas de comando e controle
Conectividade educacional	—	Acesso à internet em escolas remotas	NTN, backhaul HAPS-LEO
Vigilância cibernética	Proteção de redes militares críticas	Proteção de redes civis críticas	Criptografia pós-quântica, zero trust

Fonte: Autores (2026)

A matriz apresentada evidencia que a maior parte das aplicações identificadas possui natureza dual. Embora determinadas missões estejam diretamente associadas à Defesa nacional, como a vigilância de fronteiras, a proteção de infraestruturas críticas e o apoio a operações militares, praticamente todas as capacidades tecnológicas envolvidas apresentam aplicações civis correspondentes. Sensores eletro-ópticos, infravermelhos e radares de abertura sintética podem apoiar simultaneamente o combate ao desmatamento, o monitoramento de queimadas, a fiscalização ambiental e operações de Defesa. Da mesma forma, redes HAPS-LEO destinadas inicialmente ao apoio de tropas podem ampliar a conectividade de comunidades isoladas, escolas, unidades de saúde e órgãos de proteção ambiental.

A literatura recente sobre Internet das Coisas de Batalha (IoBT) reforça o potencial das HAPS como plataformas de borda para arquiteturas híbridas de comando e controle. Stocchero *et al*. (2023) demonstram como a combinação de Information-Centric Networking (ICN) e Software-Defined Networking (SDN) pode suportar maior agilidade em redes militares móveis, permitindo o roteamento baseado em conteúdo e a configuração dinâmica de fluxos mesmo em ambientes com conectividade intermitente, característica particularmente relevante para a vastidão da Amazônia. Essa abordagem integra-se naturalmente às plataformas HAPS, que atuam como nós intermediários de computação e backhaul resiliente para sensores distribuídos e veículos não tripulados.

Complementarmente, estudos sobre comunicações seguras em IoBT destacam a importância de paradigmas inovadores para proteger dados sensíveis em operações dual-use. Stocchero *et al.* (2022) propõem o uso de ICN e SDN para comando e controle seguro em redes de batalha, mitigando vulnerabilidades em enlaces sem fio de longa distância. Da mesma forma, Leal *et al.* (2019) evidenciam os benefícios da fusão dessas tecnologias para empoderar o C2, oferecendo maior resiliência contra interrupções e ameaças cibernéticas. Quando embarcadas em HAPS com criptografia pós-quântica, essas soluções permitem a fusão multissensorial em tempo quase real, ampliando

simultaneamente capacidades militares de vigilância de fronteiras e aplicações civis de monitoramento ambiental e resposta a desastres.

A integração de inteligência artificial embarcada amplia ainda mais esse potencial, ao permitir o processamento local de imagens, a detecção automática de padrões de interesse, a redução do volume de dados transmitidos e o apoio à tomada de decisão em tempo quase real. Complementarmente, mecanismos de criptografia pós-quântica fortalecem a proteção das comunicações críticas, tanto em aplicações militares quanto em infraestruturas civis essenciais.

Em conjunto, esses resultados indicam que plataformas HAPS podem ser compreendidas não apenas como sistemas de telecomunicações, mas como uma infraestrutura tecnológica multifuncional, capaz de integrar comunicações, sensoriamento remoto, processamento distribuído e serviços digitais em uma única arquitetura. Essa característica constitui o principal elemento que justifica seu enquadramento como tecnologia de uso dual e reforça seu potencial para atender, simultaneamente, aos objetivos de Defesa, segurança, desenvolvimento regional e soberania tecnológica na Amazônia.

4.3 Convergência de Mecanismos de Fomento, Base Industrial de Defesa e Zona Franca de Manaus

A análise das experiências internacionais evidencia que o desenvolvimento de tecnologias de uso dual não ocorre de forma espontânea, mas resulta da articulação entre políticas públicas, instrumentos de financiamento e capacidades industriais. Embora os modelos institucionais variem entre os países, observa-se uma convergência quanto à utilização de mecanismos de fomento diretos e indiretos para acelerar o desenvolvimento de tecnologias estratégicas. Os mecanismos diretos compreendem, principalmente, subvenções econômicas e financiamentos destinados a atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), enquanto os mecanismos indiretos incluem incentivos fiscais, exigências de conteúdo local, reservas de mercado e

políticas voltadas ao fortalecimento de cadeias produtivas nacionais. Em comum, esses instrumentos buscam reduzir riscos tecnológicos, estimular a inovação e fortalecer a autonomia estratégica em áreas consideradas críticas para a Defesa e para o desenvolvimento econômico.

O Brasil dispõe de instrumentos compatíveis com essa tendência internacional. O arcabouço nacional de inovação em Defesa contempla mecanismos destinados ao apoio de Empresas Estratégicas de Defesa (EED), Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICT) e projetos de PD&I em áreas como inteligência artificial, sistemas autônomos, tecnologias espaciais, sensores avançados, comunicações, cibersegurança e tecnologias quânticas. Além disso, a legislação brasileira reconhece formalmente a dualidade tecnológica, permitindo que soluções desenvolvidas para a Defesa também produzam benefícios para outros setores estratégicos da economia.

Sob essa perspectiva, a arquitetura HAPS proposta neste trabalho apresenta elevado potencial de aderência aos instrumentos de fomento existentes. Sua natureza dual permite integrar demandas relacionadas à Defesa nacional, ao monitoramento ambiental, à conectividade, à proteção de infraestruturas críticas e ao desenvolvimento regional, criando condições para a convergência entre diferentes políticas públicas de ciência, tecnologia, inovação e Defesa. A viabilidade da proposta, portanto, não depende de um único programa de financiamento, mas da articulação entre múltiplos instrumentos de apoio já existentes no ecossistema nacional de inovação, em consonância com tendências observadas internacionalmente (European Comission, 2024; U.S. Department of Defense, 2024).

Nesse contexto, a Zona Franca de Manaus representa um diferencial estratégico para a implementação dessa arquitetura. Além de concentrar um parque industrial com competências em eletrônica, telecomunicações, sistemas embarcados e manufatura avançada, o modelo incentiva investimentos privados em pesquisa, desenvolvimento e inovação por meio da Lei de Informática. Esse ambiente favorece a integração entre indústria, universidades, centros de pesquisa e instituições de Defesa,

criando condições para que atividades de projeto, integração, manutenção e futura produção de componentes associados às plataformas HAPS sejam desenvolvidas no próprio território amazônico. Assim, mais do que um centro de produção industrial, a Zona Franca de Manaus pode consolidar-se como um polo de inovação voltado ao desenvolvimento de tecnologias de uso dual, contribuindo simultaneamente para a soberania tecnológica, o fortalecimento da Base Industrial de Defesa e o desenvolvimento sustentável da Amazônia.

4.4 Arcabouço Regulatório: Espectro, Espaço Aéreo e Autorizações

A análise do arcabouço regulatório evidencia que a viabilidade da arquitetura HAPS proposta para a Amazônia depende não apenas da maturidade tecnológica das plataformas, mas também da harmonização entre normas internacionais de telecomunicações, regulamentação do espaço aéreo e procedimentos nacionais de autorização. Sob essa perspectiva, o principal desafio não consiste na inexistência de regras internacionais, mas na consolidação de um ambiente regulatório doméstico capaz de viabilizar operações contínuas em território brasileiro.

No plano internacional, observa-se significativa evolução normativa ao longo das últimas décadas. O Regulamento de Radiocomunicações (Radio Regulations – RR) da União Internacional de Telecomunicações (ITU) define HAPS como estações de radiocomunicação instaladas em plataformas posicionadas entre 20 e 50 km de altitude, nominalmente fixas em relação à superfície terrestre (ITU, 2023). Desde a Conferência Mundial de Radiocomunicações de 1997 (WRC-97), a ITU vem ampliando progressivamente as faixas de espectro destinadas a essas plataformas. As conferências de 1997, 2000, 2012 e 2019 consolidaram novas alocações de frequência para serviços HAPS, enquanto a WRC-23 reconheceu formalmente sua utilização como estações-base para redes internacionais de telecomunicações móveis (HAPS as IMT Base Stations – HIBS), estabelecendo condições técnicas para sua integração às redes móveis de quinta geração e mecanismos destinados à proteção contra interferências

em países vizinhos (ITU, 2018; 2019; 2023). Esse aspecto assume especial relevância para a Amazônia, cuja extensa faixa de fronteira demanda elevado grau de coordenação internacional na gestão do espectro radioelétrico.

No âmbito nacional, verifica-se que a operação de plataformas HAPS envolve competências compartilhadas entre diferentes órgãos governamentais. A Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) é responsável pela regulamentação do uso do espectro radioelétrico, em conformidade com as atribuições de frequência estabelecidas pela ITU para a Região 2 (Américas). Paralelamente, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) responde pelos aspectos relacionados à certificação aeronáutica, enquanto o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) disciplina a integração dessas plataformas ao espaço aéreo brasileiro e aos sistemas de gerenciamento do tráfego aéreo (ANAC, 2024; DECEA, 2024).

A literatura especializada demonstra que HAPS ocupam uma posição regulatória singular, situada entre a aviação convencional, os sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) e a infraestrutura espacial. Essa característica impõe desafios específicos relacionados à certificação de aeronaves de longa permanência, à gestão do espaço aéreo compartilhado, aos procedimentos de contingência, às autorizações para operações contínuas e à coordenação entre autoridades aeronáuticas e de telecomunicações. Trata-se de um campo regulatório em rápida evolução, no qual diversas jurisdições ainda se encontram em fase de amadurecimento institucional.

Os resultados desta pesquisa indicam que a regulamentação não constitui um obstáculo intransponível à adoção de HAPS no Brasil. Ao contrário, o arcabouço internacional atualmente disponível oferece bases técnicas e jurídicas suficientemente consolidadas para orientar a regulamentação nacional. O principal desafio passa a ser a construção de instrumentos normativos específicos que permitam operacionalizar essas plataformas em território brasileiro, conciliando requisitos de segurança operacional, gestão do espectro, proteção das fronteiras, interoperabilidade entre órgãos públicos e segurança cibernética. Nesse sentido, a consolidação de um marco

regulatório nacional para HAPS representa não apenas uma necessidade jurídica, mas um elemento estratégico para o fortalecimento da soberania tecnológica e da capacidade brasileira de desenvolver soluções próprias para o monitoramento e a proteção da Amazônia.

A integração regulatória de plataformas HAPS no contexto brasileiro comparada ao europeu foi analisada em profundidade por Erotokritou *et al.* (2025), que destacam os desafios de coexistência com a aviação civil, a necessidade de adaptação do Regulamento (UE) 2019/947 e o papel do *Experimental Regulatory Environment* da ANAC como instrumento para testar operações em ambiente controlado. Os autores enfatizam que, embora o arcabouço internacional da ITU (especialmente as alocações de WRC-23 para HIBS) forneça bases sólidas, persiste a necessidade de harmonização entre aspectos aeronáuticos (DECEA/ANAC) e de telecomunicações (ANATEL), incluindo protocolos de contingência, certificação de aeronaves de longa permanência e coordenação de fronteiras. Essa perspectiva reforça que a consolidação de um marco regulatório nacional específico, inspirado em iniciativas como o ECHO 2 da EUROCONTROL, é essencial para viabilizar operações seguras e atrair investimentos na Amazônia.

Os resultados demonstram, ainda, que a discussão regulatória deve anteceder a fase de prototipagem operacional. Assim como ocorreu historicamente com veículos aéreos não tripulados e sistemas espaciais, a consolidação de um ambiente regulatório previsível constitui condição necessária para reduzir riscos tecnológicos, atrair investimentos e acelerar o desenvolvimento de uma futura capacidade nacional baseada em plataformas HAPS.

4.5 Viabilidade da Arquitetura Dual Proposta

A análise desenvolvida ao longo deste estudo indica que a implementação de uma arquitetura baseada em plataformas HAPS na Amazônia apresenta condições favoráveis de viabilidade sob quatro perspectivas complementares: tecnológica,

operacional, institucional e industrial. A convergência desses fatores diferencia a proposta apresentada neste trabalho de iniciativas voltadas exclusivamente à conectividade, evidenciando o potencial de constituição de uma infraestrutura estratégica de uso dual capaz de integrar Defesa, segurança pública, monitoramento ambiental, conectividade e desenvolvimento regional.

A primeira dimensão refere-se à viabilidade tecnológica. A revisão da literatura demonstra elevado grau de maturidade de diversas tecnologias necessárias à arquitetura proposta, incluindo plataformas HAPS, redes não terrestres (NTN), integração HAPS-LEO, inteligência artificial embarcada, sensoriamento remoto multiespectral e mecanismos de criptografia pós-quântica. Embora algumas dessas tecnologias ainda se encontrem em níveis intermediários de maturidade tecnológica (TRL), observa-se evolução consistente e crescente adoção em programas internacionais de pesquisa e desenvolvimento. O Quadro 2 apresenta uma síntese da maturidade tecnológica dos principais componentes da arquitetura, indicando seus respectivos níveis de desenvolvimento e os desafios remanescentes para sua adoção em larga escala.

Quadro 2 – Tecnologias Habilitadoras: TRL Estimado, Risco Tecnológico e Potencial Industrial

Tecnologia	TRL Estimado	Risco Tecnológico	Potencial Industrial (ZFM)
Plataforma HAPS (estrutura e propulsão)	4–6	Alto	Médio
Sensores EO/IR/SAR embarcados	5–7	Médio	Alto
Computação de borda estratosférica	4–6	Médio-alto	Médio
Comunicações ópticas em espaço livre (FSO)	5–6	Médio	Baixo-médio
Criptografia pós-quântica embarcada (ML-KEM/ML-DSA)	5–6	Médio	Alto
IA embarcada para triagem de imagens	6–7	Baixo-médio	Alto
Rádios definidos por software	7–8	Baixo	Alto
PNT augmentation	4–5	Médio-alto	Médio

Fonte: Autores (2026)

A segunda dimensão corresponde à viabilidade operacional. A análise das aplicações identificadas demonstra que uma mesma plataforma pode atender simultaneamente demandas de Defesa nacional, segurança pública, monitoramento ambiental, proteção de infraestruturas críticas, conectividade de populações isoladas e resposta a desastres. Essa característica amplia significativamente o retorno operacional dos investimentos realizados, uma vez que os mesmos ativos podem ser empregados por diferentes órgãos governamentais. O Quadro 1, apresentado anteriormente, sintetiza os principais domínios de aplicação dual identificados neste estudo.

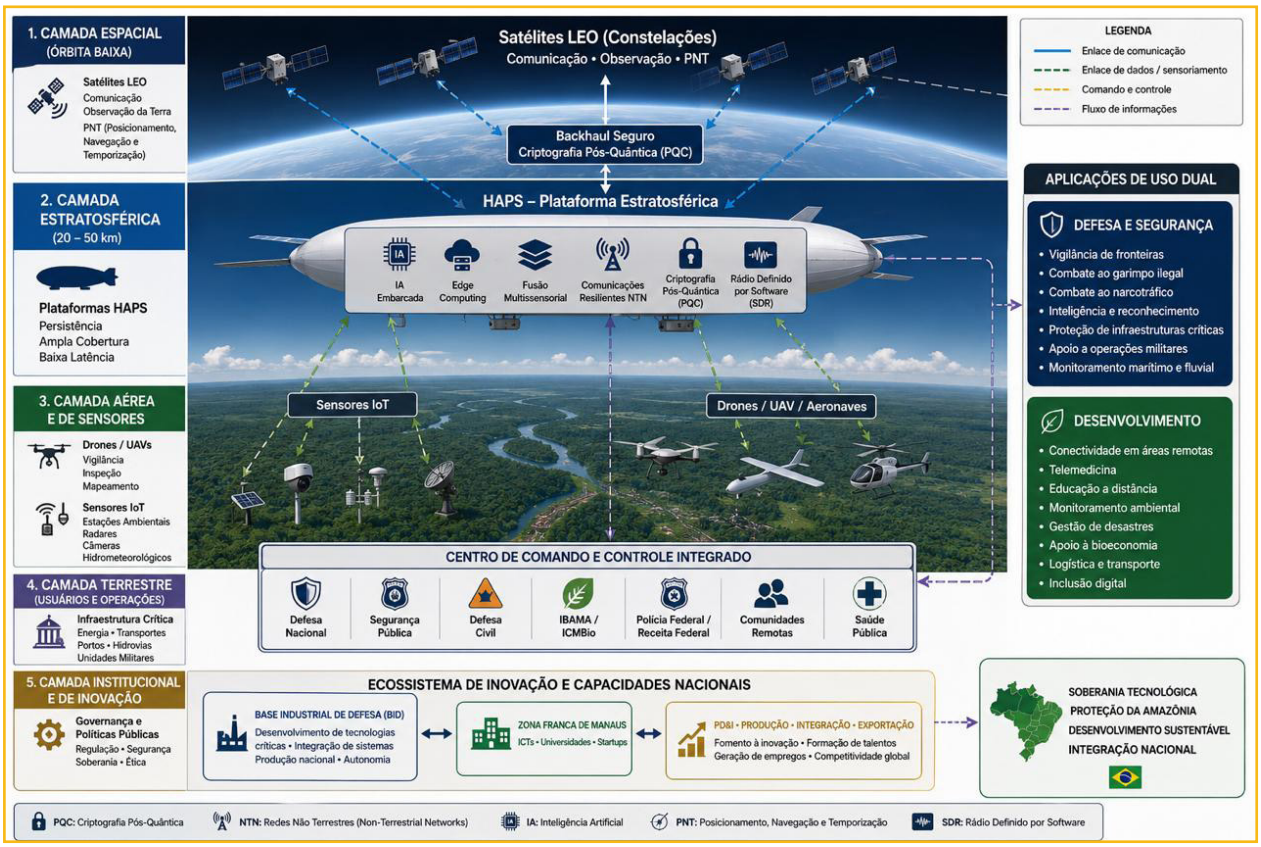
A terceira dimensão refere-se à viabilidade institucional. Os resultados indicam que o Brasil dispõe de um ambiente institucional favorável ao desenvolvimento dessa capacidade. O arcabouço regulatório internacional encontra-se suficientemente consolidado para orientar a regulamentação nacional, enquanto os instrumentos de fomento existentes, a Base Industrial de Defesa e as Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação oferecem condições para o desenvolvimento gradual dessa arquitetura em território nacional.

A quarta dimensão corresponde à viabilidade industrial e econômica. A existência da Zona Franca de Manaus, associada aos investimentos obrigatórios em pesquisa, desenvolvimento e inovação decorrentes da Lei de Informática, cria condições particularmente favoráveis para a internalização das etapas de integração, manutenção e futura produção de componentes associados às plataformas HAPS. Sob essa perspectiva, a Amazônia deixa de representar apenas um ambiente de operação dessas tecnologias e passa a constituir um potencial polo nacional de desenvolvimento industrial e inovação em sistemas de uso dual.

Em conjunto, essas evidências sustentam a hipótese formulada neste trabalho de que plataformas HAPS podem constituir uma infraestrutura estratégica de uso dual para a Amazônia, integrando capacidades de Defesa, segurança, monitoramento ambiental, conectividade e desenvolvimento regional em uma arquitetura tecnologicamente consistente, institucionalmente viável e economicamente promissora.

Essa convergência é sintetizada na Figura **1**, que apresenta a arquitetura conceitual proposta neste estudo. A figura evidencia a integração entre plataformas HAPS, satélites LEO, sensores distribuídos, inteligência artificial, comunicações resilientes e mecanismos de segurança cibernética, articulando esses elementos aos diferentes domínios de aplicação identificados ao longo da pesquisa.

Figura 1 – Proposta de arquitetura conceitual



Fonte: Autores (2026)

Após a apresentação da arquitetura, o Quadro 3 compara a solução proposta com outras alternativas tecnológicas atualmente disponíveis, permitindo identificar as principais vantagens e limitações relativas de plataformas terrestres, satélites LEO, aeronaves remotamente pilotadas e HAPS quanto à cobertura, persistência, latência, flexibilidade operacional e potencial de aplicação dual.

Quadro 3 – Comparação entre Satélites LEO, HAPS, Sistemas Aéreos MALE/HALE e Infraestrutura Terrestre

Característica	Satélites LEO	HAPS	Sistemas MALE/HALE	Infraestrutura Terrestre
Altitude operacional	~500–2.000 km	20–50 km (definição ITU-RR)	Até ~20 km (HALE)	Solo
Persistência sobre área-alvo	Limitada (passagem orbital)	Alta (estação prolongada)	Média (autonomia de horas a dias)	Permanente
Latência	Moderada a baixa (constelações)	Baixa	Baixa	Mínima
CAPEX relativo	Alto	Médio (intermediário)	Médio-alto	Variável (depende de obra civil)
OPEX relativo	Baixo-médio (amortizado na vida útil orbital)	Médio-alto (station-keeping contínuo)	Médio-alto	Variável
Flexibilidade de carga útil	Baixa (fixa pós-lançamento)	Alta (reconfigurável)	Alta	Alta
Cobertura regional	Ampla, mas intermitente	Regional contínua	Localizada	Pontual
Regulação aplicável	ITU (alocação orbital/espectro)	ITU-R (RR), ANAC, DECEA, Anatel	ANAC, DECEA	Municipal/estadual

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou o potencial das plataformas de alta altitude (High Altitude Platform Stations – HAPS) como infraestrutura de uso dual para aplicações de Defesa, segurança e desenvolvimento na Amazônia. A partir da revisão da literatura, da análise documental e da avaliação do arcabouço regulatório e institucional, verificou-se que a integração entre HAPS, satélites de órbita baixa (LEO), sensoriamento distribuído, inteligência artificial embarcada e mecanismos de criptografia pós-quântica reúne condições para ampliar significativamente as capacidades de monitoramento, conectividade e apoio à tomada de decisão em uma região caracterizada por grandes desafios territoriais, logísticos e ambientais.

Os resultados evidenciam que a adoção dessa arquitetura pode produzir benefícios simultâneos para diferentes setores de interesse nacional. Além de fortalecer

a vigilância de fronteiras, o monitoramento ambiental e a proteção de infraestruturas críticas, plataformas HAPS podem ampliar a conectividade de populações isoladas, apoiar ações de defesa civil, fortalecer serviços públicos e impulsionar aplicações relacionadas à bioeconomia, à saúde e à educação, caracterizando-se, portanto, como uma infraestrutura tecnológica de natureza genuinamente dual.

A pesquisa também demonstrou que a viabilidade dessa arquitetura não depende exclusivamente da maturidade tecnológica das plataformas. Sua implementação exige a convergência entre capacidades científicas, instrumentos de fomento, base industrial e ambiente regulatório. Nesse contexto, a existência de mecanismos nacionais de incentivo à inovação, associada às competências da Base Industrial de Defesa e ao ambiente de pesquisa e desenvolvimento existente na Zona Franca de Manaus, cria condições favoráveis para o desenvolvimento gradual de capacidades nacionais nesse domínio, reduzindo dependências tecnológicas externas e fortalecendo a soberania tecnológica brasileira.

Embora os resultados sejam promissores, permanecem desafios relevantes relacionados à regulamentação específica para operação de plataformas HAPS no espaço aéreo brasileiro, à validação experimental da arquitetura proposta, à avaliação detalhada dos custos de implantação e operação, bem como à definição de modelos de governança para compartilhamento seguro de dados entre instituições civis e militares. Essas limitações não comprometem a viabilidade da proposta, mas indicam a necessidade de aprofundamento das pesquisas antes de sua implementação em escala operacional.

Por fim, este trabalho propõe uma arquitetura conceitual destinada a orientar futuras iniciativas de pesquisa, desenvolvimento e inovação em tecnologias de uso dual para a Amazônia. Mais do que uma solução voltada exclusivamente às comunicações ou ao sensoriamento remoto, defende-se que plataformas HAPS podem constituir um novo elemento da infraestrutura estratégica nacional, integrando Defesa, segurança, desenvolvimento científico, política industrial e conectividade em uma única plataforma tecnológica.

Na Amazônia, onde as dimensões territoriais impõem desafios permanentes à presença do Estado, a soberania dependerá cada vez mais da capacidade de monitorar, comunicar, processar informações e responder de forma contínua aos eventos que afetam a região. Nesse contexto, plataformas HAPS apresentam potencial para desempenhar papel relevante na construção de uma infraestrutura tecnológica compatível com os desafios estratégicos do Brasil no século XXI.

REFERÊNCIAS

ABBASI, O.; YANIKOMEROGLU, H. UxNB-enabled cell-free massive MIMO with HAPS-assisted sub-THz backhauling. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 73, n. 5, p. 6937–6953, 2024.

AGADAKOS, I.; CIOCARLIE, G. F.; COPOS, B.; GEORGE, J.; LESLIE, N.; MICHAELIS, J. **Security for resilient IoBT systems**: Emerging research directions. *In*: IEEE INFOCOM 2019 — IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Paris: IEEE, 2019, p. 1–6.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regulamentação de Sistemas Aéreos Não Tripulados e Operações Especiais**. Brasília: ANAC, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). **Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações (PERT) 2025**. Brasília: Anatel, 2025.

ALAM, M. S.; KARABULUT KURT, G.; YANIKOMEROGLU, H.; ZHU, P.; DÀO, N. D. High altitude platform station based super macro base station constellations. **IEEE Communications Magazine**, v. 59, n. 1, p. 103–109, 2021.

CAO, X.; YANG, P.; ALZENAD, M.; XI, X.; WU, D.; YANIKOMEROGLU, H. Airborne communication networks: A survey. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 36, n. 9, p. 1907–1926, 2018.

CAPPELLO, C.; PRATIHAST, A. K.; PÉREZ OJEDA DEL ARCO, A.; REICHE, J.; DE SY, V.; HEROLD, M.; VIVANCO VICENCIO, R. E.; CASTILLO SOTO, D. Alert-driven community-based forest monitoring: A case of the Peruvian Amazon. **Remote Sensing**, v. 14, n. 17, artigo 4284, 2022. DOI: 10.3390/rs14174284.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). Inte**gração de Sistemas Não Tripulados e de Longa Permanência ao Espaço Aéreo Brasileiro**. Rio de Janeiro: DECEA, 2024.

DEL MORAL, J. O.; DE MARTI I OLIUS, A.; VIDAL, G.; CRESPO, P. M.; ETXEZARRETA MARTINEZ, J. Cybersecurity in critical infrastructures: A post-quantum cryptography perspective. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 11, n. 18, p. 30217–30244, 2024.

EROTOKRITOU, C.; STELLATOU, S.; VARGAS, I. F.; PIGNATON DE FREITAS, E. Regulatory and Operational Integration of High Altitude Platform Stations (HAPS) Considering the Brazilian and the European Perspectives. *In*: 2025 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Charlotte, NC, USA: **IEEE**, 2025, p. 944-951.

EULER, S.; LIN, X.; TEJEDOR, E.; OBREGON, E. High-altitude platform stations as international mobile telecommunications base stations: A primer on HIBS. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 17, n. 4, p. 92–100, 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **European Defence Fund**: Annual Work Programme and Calls for Proposals. Bruxelas: European Commission, Directorate-General for Defence Industry and Space, 2024.

FITZGIBBON, G.; OTTAVIANI, C. Constrained device performance benchmarking with the implementation of post-quantum cryptography. **Cryptography**, v. 8, n. 2, artigo 21, 2024. DOI: 10.3390/cryptography8020021.

GIORDANI, M.; ZORZI, M. Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities. **IEEE Network**, v. 35, n. 2, p. 244–251, 2021. DOI: 10.1109/MNET.011.2000493.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Amazônia Legal — Atualização da Malha Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Relação dos Municípios da Faixa de Fronteira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES) e Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER)** — Notas Metodológicas. São José dos Campos: INPE, 2024.

KARABULUT KURT, G.; KHOSHKHOLGH, M. G.; ALFATTANI, S.; IBRAHIM, A.; DARWISH, T. S. J.; ALAM, M. S.; YANIKOMEROGLU, H.; YONGAÇOGLU, A. A vision and framework for the high altitude platform station (HAPS) networks of the future. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 23, n. 2, p. 729–779, 2021.

LEAL, G. M.; ZACARIAS, I.; STOCCHERO, J. M.; PIGNATON DE FREITAS, E. Empowering command and control through a combination of information-centric networking and software defined networking. **IEEE Communications Magazine**, v. 57, n. 8, p. 48-55, 2019.

LEE, D.; CHOI, Y. A learning strategy for Amazon deforestation estimations using multi-modal satellite imagery. **Remote Sensing**, v. 15, n. 21, artigo 5167, 2023.

LI, X.; WEI, P.; WEI, Z. J.; GUOSONG, L.; PING, W. Research on security issues of military internet of things. *In*: 2020 17th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). Chengdu: **IEEE**, 2020, p. 399–403.

MICHALSKI, D.; BERNAT, P. Internet of things in air and missile defence — a system solution concept. *In*: 2019 International Conference on Military Technologies (ICMT). Brno: **IEEE**, 2019, p. 1–5.

MOFFETTE, F.; ALIX-GARCIA, J.; SHEA, K.; PICKENS, A. H. The impact of near-real-time deforestation alerts across the tropics. **Nature Climate Change**, v. 11, p. 172–178, 2021. DOI: 10.1038/s41558-020-00956-w.

MULLAN, K.; BIGGS, T.; CAVIGLIA-HARRIS, J.; RIBEIRO, J. R.; SANTIAGO, T. O.; SILLS, E.; WEST, T. A. P. **Estimating the Value of Near-Real-Time Satellite Information for Monitoring Deforestation in the Brazilian Amazon**. Resources for the Future (RFF), Working Paper 22-22, 2022 (atualizado em 2023).

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **FIPS 203**: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard. Gaithersburg, MD: U.S. Department of Commerce, 2024a.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **FIPS 204**: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard. Gaithersburg, MD: U.S. Department of Commerce, 2024b.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **FIPS 205**: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard. Gaithersburg, MD: U.S. Department of Commerce, 2024c.

NATIONAL SECURITY AGENCY (NSA). **Commercial National Security Algorithm Suite 2.0 (CNSA 2.0)**. Fort Meade, MD: NSA, 2022 (atualizado em 2024).

SLOUGH, T.; KOPAS, J.; URPELAINEN, J. Satellite-based deforestation alerts with training and incentives for patrolling facilitate community monitoring in the Peruvian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)**, v. 118, n. 29, e2015171118, 2021.

STOCCHERO, J. M.; CARNEIRO, A.D.; ZACARIAS, I.; PIGNATON DE FREITAS, E. Combining information centric and software defined networking to support command and control agility in military mobile networks. **Peer-to-Peer Networking and Applications**, v. 16, n. 2, p. 765-784, 2023.

STOCCHERO, J. M; SILVA, C.A; SILVA, L.S.; LAWISCH, M.A.; ANJOS, J.C.S.; PIGNATON DE FREITAS, E. Secure command and control for internet of battle things using novel network paradigms. **IEEE Communications Magazine**, v. 61, n. 5, p. 166-172, 2022.

STRAYER, T.; NELSON, S.; COFFIN, D.; THAPA, B.; KHOURY, J.; CARO, A.; ATIGHETCHI, M.; BLAIS, S. **Military IoT**: Tactical edge clouds for content sharing across heterogeneous networks. *In*: Modeling and Design of Secure Internet of Things. Hoboken: Wiley, 2022, p. 339–352.

TOKA, L.; KONRAD, M.; PEKAR, A.; BICZÓK, G. Integrating the skies for 6G: Techno-economic considerations of LEO, HAPS, and UAV technologies. **IEEE Communications Magazine**, v. 62, n. 11, p. 44–51, 2024.

TOVAR, P.; ADARME, M. O.; FEITOSA, R. Q. Deforestation detection in the Amazon rainforest with spatial and channel attention mechanisms. The International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLIII-B3-2021, p. 851–858, 2021.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ITU). **Report ITU-R F.2438-0**: Technical and operational characteristics of high altitude platform stations. Genebra: ITU, 2018.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ITU). **WRC-19 identifies additional frequency bands for High Altitude Platform Station systems**. Genebra: ITU, 2019.

UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ITU). **Radio Regulations — Resolution 221**: Use of high-altitude platform stations as IMT base stations. Genebra: ITU, 2023.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **Defense Innovation Unit (DIU)**: Mission and Portfolio Overview. Washington, DC: U.S. Department of Defense, 2024.

WIGNESS, M.; ABDELZAHER, T.; RUSSELL, S.; SWAMI, A. **Internet of battlefield things**: Challenges, opportunities, and emerging directions. *In*: Modeling and Design of Secure Internet of Things. Hoboken: Wiley, 2022, p. 5–22.

Autoria

1 Manoel Fernandes Amaral Filho

Advogado; Pesquisador; Coronel Veterano do Exército Brasileiro; Doutorando em Engenharia Elétrica

https://orcid.org/0009-0006-6496-0539 • manoel.amaral@ufam.edu.br

2 Edison Pignaton de Freitas

Graduado pelo Instituto Militar de Engenharia; Graduado em Ciências Jurídicas e Sociais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestrado e Doutorado em Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Pós-Doutorado em Engenharia Elétrica

https://orcid.org/0000-0003-4655-8889 • epfreitas@inf.ufrgs.br

3 Bruno Costa Marinho

Graduado em Ciências Militares pela Academia Militar das Agulhas Negras; Graduado em Direito pela Universidade Estácio de Sá; Mestre em Direito Ambiental pela Universidade do Estado do Amazonas; Doutor em Propriedade Intelectual e Inovação pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial; Professor Colaborador da Universidade do Estado do Amazonas; Pesquisador do Laboratório de Ciências Militares da Escola de Comando e Estado-Maior do Exército; Chefe

https://orcid.org/0000-0002-5394-5652 • marinho.bruno@ime.eb.br

Como citar este artigo

AMARAL FILHO, M. F.; FREITAS, E. P.; MARINHO, B. C. Arquitetura dual com HAPS para defesa, segurança e soberania na Amazônia. **InterAção**, Santa Maria, v. 17, n. 3, e97899, p. 1-32, 2026. DOI 10.5902/2357797597899. Disponível em: https://dx.doi.org/10.5902/2357797597899. Acesso em: dia mês abreviado. ano.