

MIM-104 PATRIOT: O SISTEMA DE DEFESA AÉREA DOS EUA

Entre mísseis, drones e limitações industriais, o Patriot revela que a defesa aérea moderna depende da integração em rede entre tecnologia, logística, treinamento e doutrina para transformar vulnerabilidades em resiliência estratégica.

Carlos A. Klomfahs*



Imagem meramente ilustrativa, gerada por inteligência artificial.

O presente artigo examina a arquitetura operacional do sistema, a complexidade de sua cadeia de suprimentos global, vulnerabilidades de projeto reconhecidas pelo próprio Departamento de Defesa dos EUA e lições aprendidas pelo Exército Brasileiro (Arma de Artilharia) em conflitos de alta intensidade, com ênfase na análise crítica de falhas documentadas pelo *U.S. Government Accountability Office* (GAO) e pelo *Project On Government Oversight* (POGO).

Isso porque, a artilharia antiaérea na guerra moderna atua como a última linha de defesa em um sistema de proteção em camadas. Sua principal função hoje vai muito além da defesa de ponto, protegendo tropas e infraestruturas críticas contra mísseis de cruzeiro, helicópteros, aeronaves de ataque e, de forma vital, drones *kamikazes*, cuja interceptação por mísseis convencionais é financeiramente inviável.

É dizer: a artilharia antiaérea na guerra moderna deixou de ser apenas um recurso de proteção de ponto para se tornar uma rede móvel e em camadas, essencial para conter drones, mísseis e aeronaves, o que exige a fusão operacional entre o Exército e a Força Aérea, em que radares terrestres alimentam centros de controle aeroespacial em tempo real permitindo interceptações conjuntas, já que a velocidade e a furtividade dos vetores aéreos modernos tornaram obsoleta a separação rígida entre as defesas baseadas em terra e no ar. Para garantir a eficácia, a doutrina militar atual adota o combate em rede (*network-centric warfare*)

1. INTRODUÇÃO: SISTEMA DE DEFESA AÉREA DO SÉCULO XXI



Figura 1: Representação esquemática da evolução da defesa aérea do Exército dos Estados Unidos, organizada em quatro fases: sistemas legados, conectividade inicial, integração em rede e capacidades futuras. As conexões, indicadores e projeções de desempenho são ilustrativos e não representam necessariamente escalas, capacidades operacionais ou cronogramas oficiais.

O Comando de Mísseis do Exército dos EUA desenvolveu o conceito do Patriot em 1961 como o Army Air Defense System for the 1970's (AADS-70s). Em sua forma inicial, o sistema seria uma plataforma móvel destinada a substituir as instalações estáticas dos mísseis HAWK e Nike Hercules. Hoje, o MIM-104 Patriot representa o principal sistema de defesa aérea e antimíssil do Exército dos Estados Unidos e de 17 nações aliadas.

Desde sua concepção até as modernizações mais recentes com radares de Nitreto de Gálio (GaN) e matrizes ativas eletronicamente varridas (AESA), o Patriot atravessou seis décadas de evolução tecnológica, engajamentos de combate e controvérsias de engenharia. Em outubro de 1964, o programa foi renomeado para Surface-to-Air Missile Development (SAM-D), e em 1967 o contratante principal foi selecionado. O primeiro teste de voo ocorreu em

novembro de 1969 (CSIS Missile Threat, 2024).

A trajetória do Patriot ilustra um padrão recorrente na indústria de defesa: sistemas projetados para ameaças de uma era – no caso, bombardeiros soviéticos sobre a Europa – são gradualmente adaptados para enfrentar ameaças radicalmente diferentes, como mísseis balísticos táticos, munições de ataque de precisão e, mais recentemente, drones de ataque em enxame.

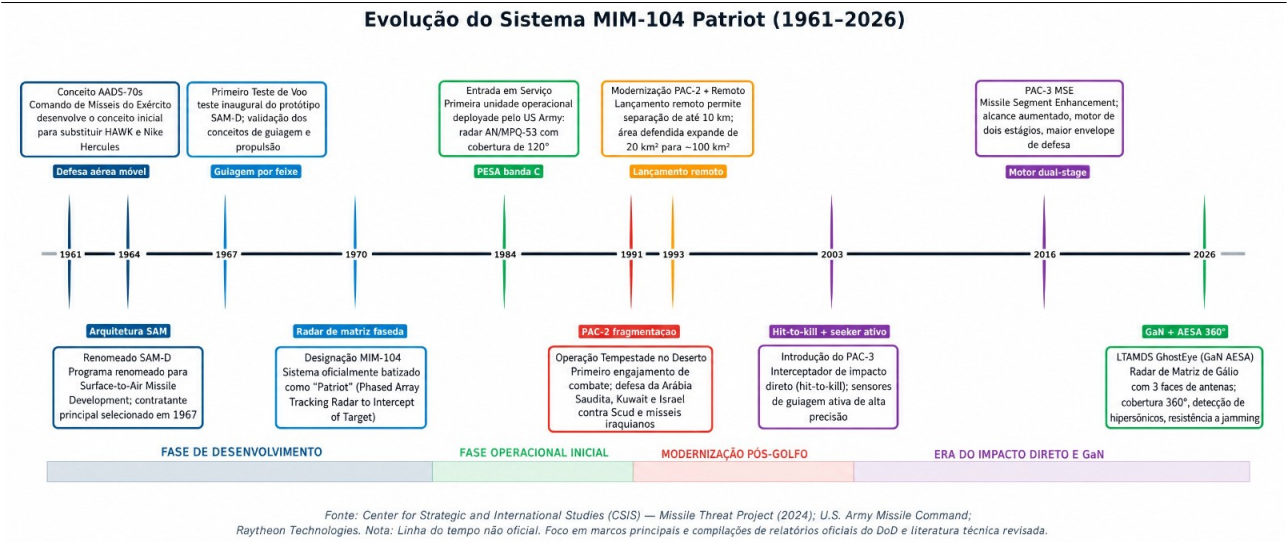


Figura 2: Linha do tempo da evolução do sistema MIM-104 Patriot, desde o conceito AADS-70s (1961) até a introdução do radar LTAMDS GhostEye com tecnologia GaN AESA (2024). Fonte: CSIS Missile Threat (2024); U.S. Army Missile Command.

2. ARQUITETURA OPERACIONAL: COMPONENTES E FUNCIONAMENTO

COMPOSIÇÃO DE UMA BATERIA

Uma bateria típica do Patriot compreende um conjunto integrado de subsistemas:

Subsistemas Componentes de uma Bateria Patriot Típica

Componente	Função Principal	Unidades por Bateria
Radar AN/MPQ-53/65/65A	Detecção, rastreamento, iluminação e guiagem do interceptador	1
Estação de Controle de Engajamento (ECS)	Processamento de dados, decisão de engajamento, interface humana	1
Lançadores M901	Plataforma de disparo dos interceptadores PAC-2/PAC-3	4-8
Geradores de Energia	Suprimento elétrico contínuo para radar e sistemas de controle	2-4
Veículos de Apoio Logístico	Transporte de mísseis, manutenção, comunicações	Vários
Interceptadores PAC-3 MSE	Mísseis de impacto direto (hit-to-kill)	16-32 por lançador

Tabela: BLOG VELHO GENERAL • Fonte: Elaboração do Autor • Criado com Datawrapper

Figura 3: Tabela de subsistemas que compõem uma bateria Patriot típica.

O CICLO “DETECÇÃO PARA ABATE” (*DETECTION-TO-KILL*)

O funcionamento do Patriot segue uma sequência de cinco etapas fundamentais:

- 1. Detecção:** O radar principal escaneia o espaço aéreo monitorado e identifica objetos em movimento.
- 2. Rastreamento e Classificação:** O sistema computa a trajetória do alvo e o classifica com base em parâmetros cinemáticos (velocidade, ângulo de descida, assinatura de radar).
- 3. Decisão de Engajamento:** O operador humano (ou, em modos automáticos, o algoritmo) avalia se a ameaça atende aos critérios de engajamento.
- 4. Lançamento e Guiagem:** O interceptador é disparado e guiado em direção ao ponto estimado de encontro (predicted interception point).
- 5. Intercepção:** Dependendo da versão do míssil, ocorre a destruição por fragmentação (PAC-2) ou impacto cinético direto (PAC-3 MSE).

Já no emprego contra mísseis balísticos, a dificuldade é amplificada pela velocidade de reentrada (que pode exceder Mach 5), pelo ângulo de descida íngreme e pelo curto tempo de reação disponível – frequentemente inferior a dois minutos entre a detecção e o impacto no solo (Postol, 1992).

3. EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA: DOS RADARES PESA AOS SISTEMAS GAN AESA

A ERA DOS RADARES DE MATRIZ PASSIVA (PESA)

As versões iniciais do Patriot utilizavam radares AN/MPQ-53 e AN/MPQ-65, operando na banda C (IEEE 5250-5925 MHz) com matrizes faseadas passivas. Esses sistemas condensavam as funções de vigilância, rastreamento e engajamento em uma única unidade móvel, uma abordagem inovadora para a época, mas com limitações severas, tais como:

Arco fixo de 120 graus: O campo de visão era restrito a um terço do círculo completo, criando pontos cegos táticos que exigiam o posicionamento cruzado de múltiplas baterias para cobertura de 360°.

Vulnerabilidade a interferência eletrônica (*jamming*): A arquitetura analógica oferecia menor robustez contra contramedidas eletrônicas adversas.

A REVOLUÇÃO DO NITRETO DE GÁLIO (GAN) E DO LTAMDS GHOSTEYE

A grande transformação tecnológica atual é a transição para radares baseados em Nitreto de Gálio (GaN) e matrizes ativas eletronicamente varridas (AESA), materializada no radar

LTAMDS (*Lower Tier Air and Missile Defense Sensor*) GhostEye, desenvolvido pela Raytheon. As vantagens incluem:

- a. **Cobertura de 360°:** Três faces de antenas sobrepostas eliminam completamente os pontos cegos.
- b. **Dobra da potência de emissão:** Os transistores de potência em GaN oferecem densidade de potência superior ao Arseneto de Gálio (GaAs) tradicional, permitindo detecção de ameaças hipersônicas a maiores distâncias (Trew, 2002).
- c. **Maior resistência a jamming:** A arquitetura digital AESA permite *beam forming* adaptativo, reduzindo a susceptibilidade a interferências direcionadas.

A tecnologia RIG-360 (*Remote Interceptor Guidance 360 Degrees*) permite, adicionalmente, que o interceptador seja guiado por dados de sensores externos mesmo quando o alvo está fora do arco visual do radar principal da bateria, um conceito central às arquiteturas de defesa aérea em rede.

4. COMPLEXIDADE INDUSTRIAL E CADEIA DE SUPRIMENTOS GLOBAL

UMA REDE DE MILHARES DE FORNECEDORES

A produção de um interceptador PAC-3 MSE exige uma cadeia de suprimentos global de extraordinária complexidade. A montagem final ocorre na fábrica da Lockheed Martin Missiles and Fire Control na Flórida, mas depende de milhares de subcontratados espalhados por diversos países, incluindo o Japão e a Alemanha.

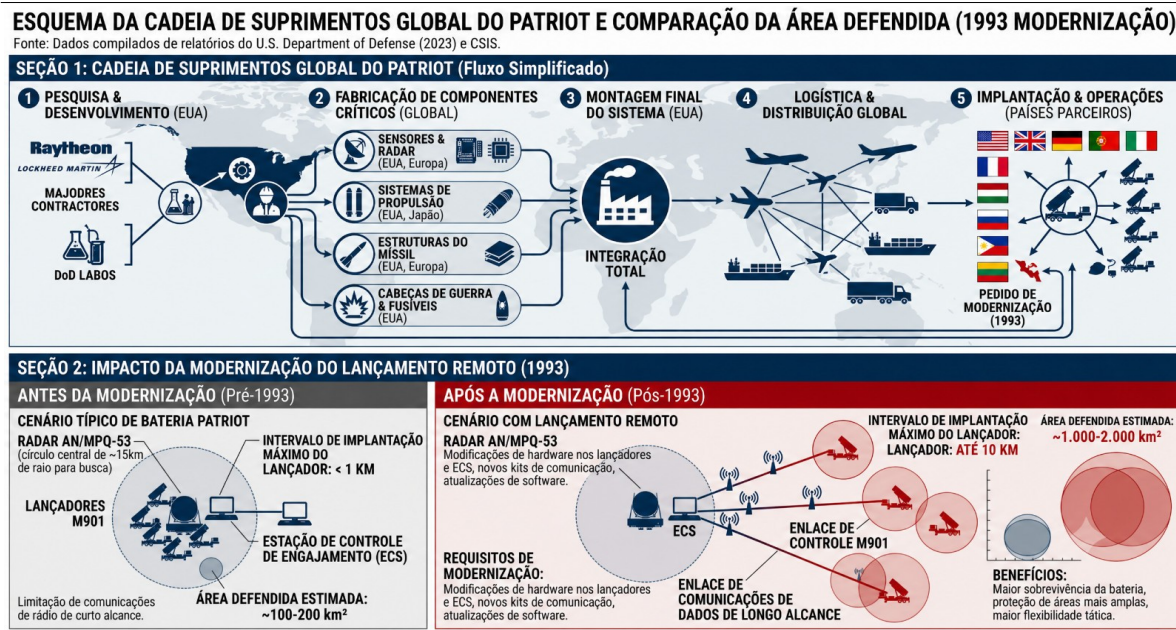


Figura 4: Esquema da cadeia de suprimentos global do Patriot e comparação da área defendida antes e depois da modernização para lançamento remoto (1993). Fonte: Dados compilados de relatórios do U.S. Department of Defense (2023) e CSIS.

GARGALOS CRÍTICOS: SENSORES DE GUIAGEM E NITRETO DE GÁLIO

Os sensores de guiagem (*seekers*) representam o elemento mais desafiador da produção. Para triplicar a capacidade de fabricação desses componentes – essenciais para a precisão de impacto direto (*hit-to-kill*) –, o Departamento de Defesa dos EUA firmou acordos plurianuais com empresas como a Boeing.

No entanto, apesar de contratos bilionários recentes, aumentar a produção de cerca de 600 para milhares de interceptadores ao ano é um processo que leva anos, devido à necessidade de expandir instalações e treinar mão de obra altamente especializada (GAO, 2023).

O Nitreto de Gálio (GaN) é outro gargalo crítico. Sua fabricação requer substratos de alta pureza, epitaxia de precisão e processos de litografia avançados, com poucos fornecedores globais capacitados, principalmente nos EUA e no Japão.

A escassez de matérias-primas e componentes eletrônicos avançados têm impulsionado um movimento de descentralização da produção, incluindo licenciamento para países como a Ucrânia (U.S. Department of Defense, 2024).

CUSTO E TEMPO DE TREINAMENTO



Figura 5: Custos estimados por componente do sistema Patriot e tempo de treinamento por especialidade. Fonte: U.S. Army Training and Doctrine Command; estimativas de mercado baseadas em contratos do DoD (2023–2024).

Além do custo, o treinamento de pessoal é igualmente oneroso, por exemplo: Operador de sistema de lançamento: tempo de treinamento de 13 semanas; Operador de controle de fogo: 20 semanas; e Reparo do sistema Patriot: 53 semanas.

Por exemplo, dos 15 batalhões Patriot atualmente disponíveis no Exército dos EUA, um geralmente está em modernização como parte de um ciclo de aproximadamente 15 anos, o que torna a decisão de enviar uma bateria para a Ucrânia tanto uma expressão de compromisso político quanto um reforço tático significativo.

5. VULNERABILIDADES DE PROJETO

O “PONTO CEGO” DE 120 GRAUS: O MAIOR ERRO DE ENGENHARIA

O projeto original dos radares AN/MPQ-53 e AN/MPQ-65 limitou o campo de visão a um arco fixo de 120 graus. A engenharia focou na defesa contra ameaças vindas de uma direção previsível – bombardeiros soviéticos sobre a Europa –, mas essa premissa se tornou obsoleta com a proliferação de mísseis de cruzeiro, drones e munições de ataque de precisão, capazes de flanquear a bateria.

Outros exércitos aprenderam a explorar essa vulnerabilidade, programando mísseis para atacar por trás ou pelos lados da bateria. Isso forçou o Exército americano a posicionar múltiplas baterias cruzadas, uma solução logística e financeiramente ineficiente, até que o Pentágono financiasse a substituição completa do projeto pelo radar LTAMDS (GhostEye), com cobertura de 360°.

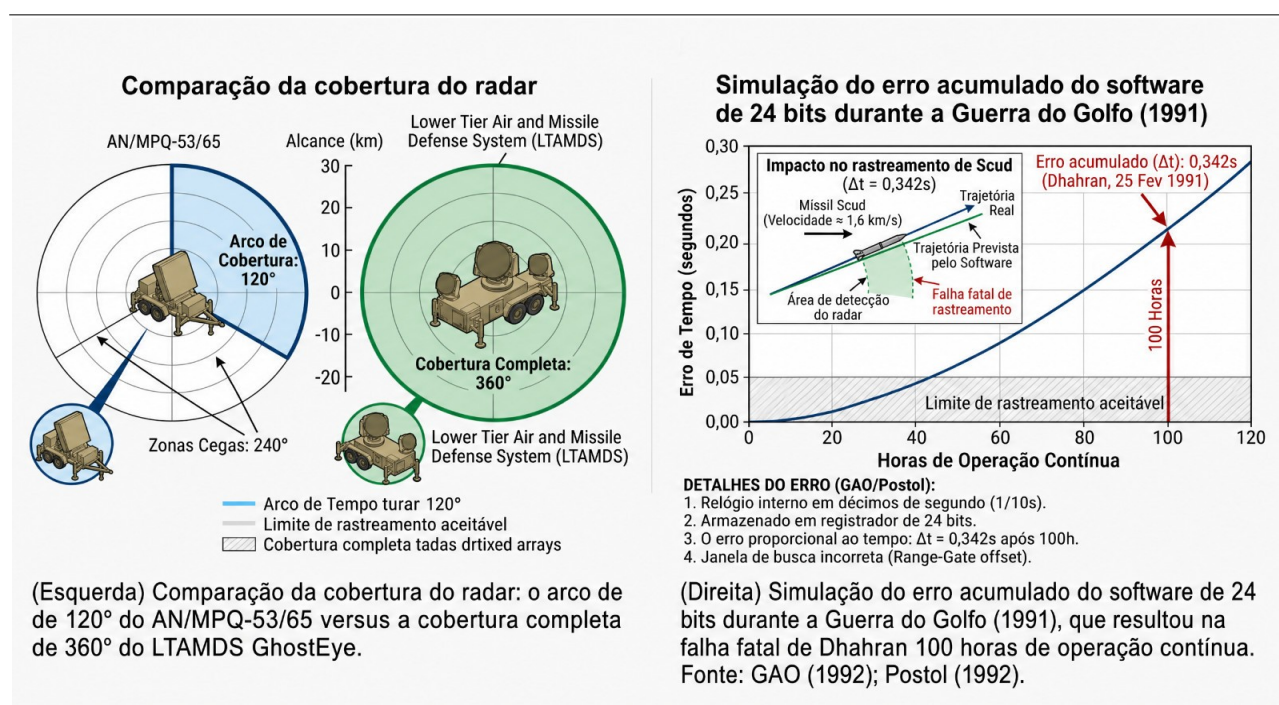


Figura 6: Comparação da cobertura do radar: o arco de 120° do AN/MPQ-53/65 versus a cobertura completa de 360° do LTAMDS GhostEye (à direita). Simulação do erro acumulado do software de 24 bits durante a Guerra do Golfo (1991), que resultou na falha fatal de Dhahran após 100 horas de operação contínua. Fonte: GAO (1992); Postol (1992).

VULNERABILIDADE A MÍSSEIS ANTI-RADAR (ARM)

O radar principal do Patriot emite ondas eletromagnéticas contínuas e de altíssima potência para detectar alvos rápidos e furtivos a longas distâncias. Isso faz com que a bateria atue como um “farol” gigante no espectro de guerra eletrônica, facilmente detectável por sistemas de Alerta de Aproximação de Radar (RWR) inimigos.

Logo, a previsibilidade da posição – o radar é um equipamento pesado montado em um caminhão dedicado, incapaz de se mover durante a emissão – torna a bateria vulnerável a modernos mísseis antirradar, como o Kh-31P russo ou mísseis hipersônicos Kinzhal.

Portanto, essas ameaças podem travar nas coordenadas de emissão ativa antes mesmo que o Patriot complete o ciclo de abate do alvo lançador.

As estratégias de mitigação incluem:

- a. Saltos táticos (*tactical displacement*):** Movimentação constante da bateria entre posições.
- b. Iscas ativas (*decoys*):** Emissores que simulam o sinal do radar principal para confundir a cabeça de busca do míssil anti-radar.
- c. Operação em modo intermitente (*emission control*):** Redução do tempo de emissão ativa ao mínimo necessário.

FALHAS CRÍTICAS DE SOFTWARE: O CASO DE DHAHRAN

Um dos erros de engenharia de *software* mais graves documentados pelo GAO ocorreu durante a Guerra do Golfo (1991). O computador de controle de armas do Patriot utilizava aritmética de 24 bits herdada da década de 1970, pois, a cada hora de operação contínua, o relógio interno acumulava um pequeno erro de conversão matemática decorrente da representação binária imprecisa de frações decimais.

Depois de 100 horas ligado, o erro desviou a “janela de busca” (*range gate*) do radar em aproximadamente 0,5 metro – suficiente para fazer com que o Patriot “olhasse para o lugar errado”. Com efeito, o resultado foi a falha na interceptação de um míssil Scud sobre Dhahran, Arábia Saudita, que matou 28 soldados e feriu outros 98 (GAO, 1992; Postol, 1992).

Portanto, “o erro de arredondamento acumulado ao longo de 100 horas de operação contínua deslocou a janela de rastreamento para fora do envelope do alvo, resultando em falha de interceptação total.” – U.S. Government Accountability Office, Report NSIAD-92-26, 1992.

FALHAS CRÍTICAS DE SOFTWARE: O CASO DE DHAHRAN

Quando o relógio erra, o radar olha para o lugar errado.



Figura 7: Infográfico esquemático sobre a falha de interceptação do sistema Patriot em Dhahran, durante a Guerra do Golfo (1991), atribuída ao erro de arredondamento acumulado na aritmética de 24 bits do computador de controle após 100 horas de operação contínua. Os valores e a reconstrução visual baseiam-se no GAO, Report NSIAD-92-26 (1992), e em Postol (1992).

PROBLEMAS DE INTEGRAÇÃO MULTIFONTE

Relatórios recentes do Project On Government Oversight (POGO) e do GAO apontam que os pacotes de *software* modernos do Patriot frequentemente falham em testes de voo quando tentam trocar dados em tempo real com sistemas complementares, como o THAAD. Essas falhas geram erros de classificação, identificação e gerenciamento de rastro do alvo, problemas críticos em ambientes de alta densidade de ameaças (POGO, 2023).

6. ENGAJAMENTOS DE COMBATE: LIÇÕES DA GUERRA DO GOLFO

OPERAÇÃO TEMPESTADE NO DESERTO (1991)

O Patriot entrou em serviço de combate pela primeira vez durante a Guerra do Golfo de 1991, defendendo ativos críticos na Arábia Saudita, Kuwait e Israel. A decisão de enviar baterias PAC-2 para Israel foi considerada crucial para evitar o envolvimento direto de Tel Aviv na guerra. Embora inicialmente elogiado pelo público, o desempenho do Patriot tornou-se objeto de controvérsia acadêmica.

A ogiva de fragmentação e explosão de 90 kg do PAC-2 ocasionalmente não conseguia destruir completamente os mísseis Scud que se aproximavam. Estudos posteriores do Massachusetts Institute of Technology (MIT), liderados pelo físico Theodore Postol,

concluíram que a taxa de sucesso do Patriot contra Scuds foi significativamente inferior às alegações iniciais do Exército dos EUA – possivelmente tão baixa quanto zero intercepções bem-sucedidas em alguns cenários (Postol, 1992; Lewis & Postol, 1993).

CONFLITOS CONTEMPORÂNEOS

Em operações prolongadas de alta intensidade, o consumo de interceptadores torna-se uma questão estratégica. Mísseis de defesa aérea modernos são caros e demoram para ser produzidos. Isso obriga comandantes e governos a decidir:

- Quais alvos valem uma intercepção de US\$ 4 milhões?
- Como proteger estoques limitados de interceptadores?
- Como combinar o Patriot com sistemas de menor custo (como o NASAMS ou sistemas de defesa a curto alcance) para ameaças menos sofisticadas?

Portanto, a dependência de estoque cria janelas temporárias de vulnerabilidade em conflitos onde a taxa de disparo de interceptadores supera a velocidade de reposição das fábricas.

7. AMEAÇAS À CADEIA DE SUPRIMENTOS: CIBERSEGURANÇA E ESPIONAGEM INDUSTRIAL

Como é sabido, o complexo industrial-militar norte-americano está sob constante ameaça de espionagem industrial e ataques cibernéticos. Recentemente, incidentes documentados expuseram engenheiros e dados sensíveis de empresas ligadas ao projeto Patriot, incluindo projetos de radar e especificações de interceptadores.

A descentralização da produção, embora estratégica para aumentar a resiliência, também amplifica a superfície de ataque. Cada subcontratado global representa um potencial ponto de entrada para adversários estatais ou grupos patrocinados por governos.

CONCLUSÃO

Vimos que a velocidade e a furtividade dos vetores aéreos modernos tornaram obsoleta a separação rígida entre as defesas baseadas em terra e no ar e que para garantir a eficácia, a doutrina militar atual adota o combate em rede (*network-centric warfare*), o que exige a fusão operacional entre o Exército e a Força Aérea, lições cruciais para o Exército Brasileiro e a Força Aérea Brasileira, não só em exercícios conjuntos periódicos, mas na doutrina, treinamento e manutenção dos sistemas e no controle dos insumos críticos das defesas

aéreas e antiaéreas nacionais.

Explicamos que o MIM-104 Patriot é, simultaneamente, um monumento à engenharia de defesa aérea e um estudo de caso sobre os desafios de manter sistemas legados relevantes em um ambiente de ameaças em rápida evolução. As vulnerabilidades reportadas em fontes abertas – o ponto cego de 120 graus, a emissão de sinal de alta potência, os erros de *software* históricos e os gargalos de produção – não são meras curiosidades técnicas, mas fatores que moldam decisões táticas e estratégicas em campo.

A transição para o radar LTAMDS GhostEye com tecnologia GaN AESA representa uma correção fundamental de trajetória, eliminando a principal falha de arquitetura do sistema. No entanto, a complexidade da cadeia de suprimentos, o tempo de treinamento do pessoal e o custo unitário dos interceptadores continuam a impor limites severos à escalabilidade operacional.

Para nações que operam, extraem lições ou pretendem operar o Patriot – incluindo a Ucrânia –, a lição central é clara: não há defesa contra os modernos mísseis hipersônicos russos, além da eficácia de um sistema de defesa aérea avançado que depende tanto de seus componentes tecnológicos quanto da logística de manutenção, do treinamento especializado, da proteção da cadeia de suprimentos e da integração tática com sistemas de defesa de múltiplas camadas.

REFERÊNCIAS

ALBERTS, D. S., GARSTKA, J. J., & STEIN, F. P. *Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority* (2nd ed.). CCRP Publication Series, 1999. Disponível em: https://www.dodccrp.org/files/Alberts_NCW.pdf.

MISSILE THREAT. *MIM-104 Patriot*. CSIS Missile Defense Project, 23 de agosto de 2023. Disponível em: <https://missilethreat.csis.org/system/patriot/>.

LEWIS, G. N. e POSTOL, T. A. *Video Evidence on the Effectiveness of Patriot during the 1991 Gulf War*. *Science & Global Security*, 4(1), 1-63. 1993. Disponível em: <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs04lewis.pdf>.

POSTOL, T. A. *Lessons of the Gulf War Experience with Patriot*. *International Security*, 16(3), 119–171. Semantic Scholar, 24 de janeiro de 1991. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Lessons-of-the-Gulf-War-Experience-with-Patriot-Postol/9ef26ec87b44838d90bd89f6ebe6fd5991f101ac>.

BURGER, Virginia. *Exquisite Defense Fails in Practice: Operation Epic Fury has revealed the (expensive) gaps in U.S. defense capabilities*. Project on Government Oversight (POGO), 15 de

maio de 2026. Disponível em: <https://www.pogo.org/analyses/exquisite-defense-fails-in-practice>.

TREW, R. J. *SiC and GaN Transistors: Is There One Winner for Microwave Power Applications?* Proceedings of the IEEE, 90(6), 1032–1047, 30 de junho de 2002. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=L1KhPQoAAAAJ&citation_for_view=L1KhPQoAAAAJ:u-x6o8ySG0sC.

U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE (GAO). *Patriot Missile Defense: Software Problem Led to System Failure at Dhahran, Saudi Arabia.* Report NSIAD-92-26, 4 de fevereiro de 1992. Disponível em: <https://www.gao.gov/products/imtec-92-26>.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. *Defense-Critical Supply Chain Resilience.* NDIA Manufacturing Division Meeting, 2 de maio de 2024. Disponível em: <https://ndia.dtic.mil/wp-content/uploads/2024/manufacturing/Ratcliff.pdf>.

**Carlos A. Klomfahs é advogado, especialista em Direito Internacional dos Conflitos Armados e operador de Inteligência. Egresso curso de geopolítica da ECEME e estratégia marítima da Escola de Guerra Naval. É mestrando no Programa de Pós-Graduação em Segurança Internacional e Defesa (PPGSID) da Escola Superior de Guerra.*
