UFSM

InterAção

ISSN 2357-7975
ACESSO ABERTO

IA., Santa Maria, v. 17, n. 3, e97841, p. 1-28, 2026 • https://dx.doi.org/10.5902/2357797597841
Submissão: 21/07/2026 • Aprovação: 14/09/2026 • Publicação: 02/10/2026

Artigos Dossiê

Tecnologias quânticas como ativo estratégico: potências e a defesa do Brasil

Quantum technologies as strategic assets: power disputes and Brazil's defense

Thays Felipe David de Oliveira[I]
Carlos Eduardo Franco Azevedo[II]
Fernando M. Araújo-Moreira[III]

[I]Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil
[II]Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
[III]Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo

As tecnologias quânticas consolidaram-se como diferencial estratégico na nova ordem internacional, impulsionando uma corrida por supremacia entre Estados Unidos, China e União Europeia. Este estudo analisa a influência da corrida internacional por tecnologias quânticas na formulação da estratégia de defesa brasileira no período de 2019 a 2024, utilizando o método de *process tracing* para identificar encadeamentos causais entre a evolução dos investimentos globais e suas implicações para a segurança nacional e soberania tecnológica do Brasil. A partir de documentos governamentais, relatórios institucionais verificáveis e literatura científica indexada, identificam-se cinco mecanismos causais principais: efeito de sinalização estratégica, demonstrações tecnológicas como catalisadores, cascata de dependência tecnológica, fragmentação institucional e ciclo de marginalização tecnológica. A Política Nacional de Defesa brasileira (Decreto nº 12.725/2025) reconhece explicitamente a computação quântica como tecnologia disruptiva que acentua assimetrias na área da defesa, mas sem estratégia operacional equivalente ao NSM-10 norte-americano ou à NATO Quantum Strategy. Conclui-se que o fortalecimento das capacidades quânticas é imperativo estratégico para garantir autonomia tecnológica e preparar estruturas de defesa para os desafios da nova competição tecnológica global.

Palavras-chave: Tecnologias quânticas; Defesa Nacional; Geopolítica; Segurança internacional; Soberania tecnológica

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

ABSTRACT

Quantum technologies have established themselves as a strategic differentiator in the new international order, driving a race for supremacy among the United States, China, and the European Union. This study analyzes the influence of the international race for quantum technologies on the formulation of Brazilian defense strategy from 2019 to 2024, using the *process tracing* method to identify causal chains between the evolution of global investments and their implications for Brazil's national security and technological sovereignty. Drawing on verified governmental documents, institutional reports and indexed scientific literature, five main causal mechanisms are identified: strategic signaling effect, technological demonstrations as catalysts, technological dependency cascade, institutional fragmentation, and vicious cycle of marginalization. Brazil's National Defense Policy (Decree No. 12,725/2025) explicitly recognizes quantum computing as a disruptive technology that deepens asymmetries in defense, yet without an operational strategy equivalent to the U.S. NSM-10 or the NATO Quantum Strategy. It is concluded that strengthening quantum capabilities is a strategic imperative to guarantee technological autonomy and prepare defense structures for the challenges of the new global technological competition.

Keywords: Quantum technologies; National defense; Geopolitics; International security; Technological sovereignty

1 INTRODUÇÃO

De que forma a corrida internacional por tecnologias quânticas influencia a estratégia de defesa brasileira no contexto geopolítico contemporâneo? Esta pergunta norteia o presente estudo, que tem como objetivo geral analisar os encadeamentos causais entre a evolução dos investimentos globais em tecnologias quânticas e suas implicações estratégicas para a segurança nacional e soberania tecnológica do Brasil no período de 2019 a 2024.

As tecnologias quânticas emergem como elemento central nas disputas por hegemonia tecnológica entre as principais potências mundiais. A Política Nacional de Defesa brasileira, aprovada pelo Decreto nº 12.725, de 18 de novembro de 2025, reconhece explicitamente que "as tecnologias disruptivas, como a inteligência artificial, a realidade virtual e aumentada e a computação quântica, acentuam as assimetrias na área da Defesa, o que influencia o equilíbrio de poder entre os países" (BRASIL, 2025a). Este reconhecimento governamental reforça a relevância do tema para a agenda estratégica nacional.

No plano internacional, a *Summary of NATO's Quantum Technologies Strategy*, publicada em janeiro de 2024, reconhece formalmente que as tecnologias quânticas "têm implicações potencialmente revolucionárias e disruptivas, podendo degradar a capacidade da Aliança de dissuadir e defender seus membros", constituindo-se como "elemento de competição estratégica" (NATO, 2024). O relatório da RAND Corporation elaborado por PARKER et al. (2022) demonstra que EUA e China são os dois líderes destacados em ciência e tecnologia quântica por praticamente todas as métricas relevantes, enquanto a Casa Branca institucionalizou pelo National Security Memorandum 10 (NSM-10), de 4 de maio de 2022, a urgência de transição para criptografia resistente a computadores quânticos, com horizonte de 2035 para conclusão da migração (WHITE HOUSE, 2022).

No plano doméstico, a EMBRAPII anunciou em outubro de 2023 R$ 60 milhões para o Centro de Competência em Tecnologias Quânticas, e a FAPESP lançou em dezembro de 2024 o programa QuTIa com R$ 31 milhões (EMBRAPII, 2023; FAPESP, 2024). A Estratégia Nacional de Cibersegurança – E-Ciber, instituída pelo Decreto nº 12.573, de 4 de agosto de 2025, incorporou a computação quântica entre as tecnologias emergentes prioritárias para redução da dependência tecnológica (BRASIL, 2025b). Apesar desses avanços normativos, o Brasil ainda não dispõe de estratégia quântica específica para a defesa com cronograma e metas equivalentes aos documentos internacionais de referência.

Este artigo estrutura-se em cinco seções. A segunda apresenta o referencial teórico. A terceira detalha a metodologia. A quarta apresenta resultados e discussões exclusivamente com base em fontes governamentais e institucionais verificáveis. A quinta seção expõe as conclusões e recomendações estratégicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos das Tecnologias Quânticas Aplicadas à Defesa

As tecnologias quânticas fundamentam-se nos princípios da mecânica quântica, explorando fenômenos como superposição, emaranhamento e tunelamento quântico para desenvolver capacidades computacionais, comunicacionais e de sensoriamento radicalmente superiores às tecnologias clássicas (PRESKILL, 2018). NIELSEN e CHUANG (2000) estabeleceram as bases teóricas da computação quântica, demonstrando como qubits podem existir simultaneamente em múltiplos estados, permitindo paralelismo massivo no processamento de informações. KRELINA (2021), em estudo publicado na EPJ Quantum Technology, sistematiza as aplicações militares, demonstrando que as tecnologias quânticas não introduzem fundamentalmente novas armas, mas aprimoram significativamente as capacidades existentes de sensoriamento, comunicação e computação. DUNJKO e BRIEGEL (2018) sistematizam, por sua vez, a convergência entre computação quântica e aprendizado de máquina, campo que fundamenta a articulação entre inteligência artificial e tecnologias quânticas adotada como eixo estruturante da Rede IATQ (CAPES; MD, 2024).

No domínio das comunicações, WEHNER et al. (2018) demonstram que a distribuição quântica de chaves (QKD) utiliza o princípio da não-clonagem quântica para garantir segurança informação-teorética. XU et al. (2020) documentam como o satélite chinês Micius estabeleceu o precedente de QKD via satélite com alcance intercontinental. PIRANDOLA et al. (2020) oferecem revisão abrangente dos avanços em criptografia quântica, incluindo protocolos QKD e suas limitações experimentais. O SIPRI (2025), no relatório Military and Security Dimensions of Quantum Technologies elaborado por KRELINA, sintetiza as aplicações militares desses avanços, destacando comunicações seguras, posicionamento em ambientes *GPS-denied* e detecção de plataformas submersas como os domínios de maior maturidade tecnológica e impacto estratégico imediato.

No sensoriamento quântico, DEGEN et al. (2017) demonstram que a sensibilidade de estados quânticos a perturbações externas permite desenvolver magnetômetros, gravímetros e acelerômetros com precisão sem precedentes. Essas capacidades têm implicações diretas para a detecção de submarinos, navegação autônoma e monitoramento de fronteiras – domínios de interesse estratégico direto para o Brasil, dado o programa de Submarino Convencionalmente Armado com Propulsão Nuclear (SCPN) priorizado pela Estratégia Nacional de Defesa (BRASIL, 2025a) e a extensão da Amazônia Azul. No domínio da criptografia, a publicação pelo NIST dos padrões FIPS 203, 204 e 205 em agosto de 2024 representa a resposta institucional norte-americana ao risco concreto de ruptura da infraestrutura criptográfica convencional (NIST, 2024).

2.2 Competição Tecnológica e Estratégia nas Relações Internacionais

A competição por supremacia em tecnologias quânticas insere-se no arcabouço mais amplo da competição tecnológica entre grandes potências. WALTZ (1979) argumenta que a estrutura anárquica do sistema internacional compele os Estados a buscarem capacidades relativas em domínios críticos para a segurança. WENDT (1999) complementa essa análise ao enfatizar como percepções de ameaça e identidades estratégicas moldam padrões de competição tecnológica entre atores estatais.

A OTAN formalizou essa perspectiva ao aprovar sua primeira Estratégia de Tecnologias Quânticas em novembro de 2023, publicada em janeiro de 2024. O documento declara que as tecnologias quânticas são “um elemento de competição estratégica” e que “os Aliados e a OTAN devem urgentemente acelerar o desenvolvimento de tecnologias quânticas” para evitar novas lacunas de capacidade (NATO, 2024). KANIA e COSTELLO (CNAS, 2018) documentam os investimentos chineses em tecnologias quânticas, identificando padrões de mobilização estatal coordenada incluindo o Laboratório Nacional para Ciências da Informação Quântica em Hefei. O relatório MERICS (2024) conclui que a China está posicionada para dominar comunicações quânticas em razão de suas implantações avançadas, enquanto o Ocidente permanece em estágios de planejamento.

Em testemunho perante a *U.S.-China Economic and Security Review Commission (USCC)* em fevereiro de 2024, PARKER (RAND) afirmou que os EUA estão à frente da China em todas as tecnologias quânticas com maior potencial de vantagem operacional militar, embora nem sempre por grande margem. O relatório RAND (PARKER et al., 2022) recomendava monitorar os fluxos internacionais de componentes críticos – recomendação que se materializou em controles de exportação que afetam diretamente países como o Brasil, conforme documenta o mesmo relatório.

Os conceitos de anarquia internacional (WALTZ, 1979) e de identidades estratégicas (WENDT, 1999) fornecem o arcabouço teórico para a formulação dos mecanismos causais testados neste estudo. A anarquia explica por que a percepção de lacunas de capacidade tecnológica — como os documentados pela RAND (PARKER et al., 2022) — gera respostas institucionais em cadeia (Mecanismo 1: Sinalização Estratégica). Já o conceito de identidades estratégicas permite compreender como demonstrações tecnológicas públicas (Mecanismo 2) são interpretadas como sinalizações de intenção por outros atores estatais, catalisando percepções de vulnerabilidade. A posição periférica do Brasil, por sua vez, pode ser analisada à luz da construção social de identidades que naturalizam a dependência tecnológica (Mecanismo 5: Ciclo de Marginalização). Essas conexões teóricas são operacionalizadas na seção 4 por meio dos cinco mecanismos causais, cada um especificado com evidências documentais e testes de *process tracing*.

2.3 O Contexto Estratégico Brasileiro

O Brasil possui tradição estabelecida em pesquisa fundamental em física quântica, com grupos de excelência em universidades como USP, UNICAMP, UFRJ e UFMG (LETA; MEIS, 1996). No plano normativo, a Política Nacional de Defesa (Decreto nº 12.725/2025) identifica os setores Nuclear, Cibernético e Espacial como os três eixos estratégicos da Estratégia Nacional de Defesa, e reconhece que "países que investem em inovação e produzem tecnologias disruptivas tendem a ter mais capacidade"

de desenvolvimento, enquanto "aqueles que absorvem tecnologias, sem investir em seu próprio processo de conhecimento, tendem a exercer papel secundário no cenário mundial" (BRASIL, 2025a). A Estratégia Nacional de Cibersegurança (Decreto nº 12.573/2025) estabelece como eixo de soberania nacional a "redução do déficit tecnológico" e incentiva o desenvolvimento de tecnologias emergentes, incluindo a computação quântica (BRASIL, 2025b).

No plano institucional, a EMBRAPII anunciou em outubro de 2023 o Centro de Competência em Tecnologias Quânticas (R$ 60 milhões) e a FAPESP lançou o programa QuTIa em dezembro de 2024 (R$ 31 milhões) (EMBRAPII, 2023; FAPESP, 2024). A Rede de Pesquisa sobre Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas em proveito da Defesa (Rede IATQ), vinculada ao Programa PRÓ-DEFESA V e liderada pelo Instituto Militar de Engenharia (IME), reúne mais de 100 pesquisadores de 41 instituições civis e militares, representando o esforço de articulação mais amplo já realizado no Brasil neste domínio (CAPES; MINISTÉRIO DA DEFESA, 2024). Apesar desses avanços, RAPINI (2007) identifica padrões historicamente fracos de interação universidade-empresa no Brasil, limitação estrutural que persiste no campo quântico. O referencial teórico aqui delineado orienta a análise empírica das seções subsequentes.

3 METODOLOGIA

Este estudo emprega o método de *process tracing* para identificar e rastrear mecanismos causais através dos quais a corrida internacional por tecnologias quânticas influencia a estratégia de defesa brasileira. Conforme definido por BEACH e PEDERSEN (2013), *process tracing* constitui método analítico que examina processos causais – a cadeia de eventos conectando causas independentes a resultados dependentes – através de evidências empíricas. BENNETT e CHECKEL (2015) enfatizam que o *process tracing* distingue-se por sua capacidade de abrir a "caixa preta" da causalidade, identificando não apenas correlações mas mecanismos causais específicos. Seguindo GEORGE e BENNETT (2005), adota-se abordagem de *process*

tracing theory-testing, onde mecanismos causais hipotéticos são sistematicamente confrontados com evidências empíricas.

A pesquisa documental restringe-se a fontes verificáveis em cinco categorias: (1) documentos estratégicos governamentais – Decretos nº 12.725/2025 (PND/END/LBDN) e nº 12.573/2025 (E-Ciber) do governo brasileiro; NSM-10 (EUA, 2022); NATO Quantum Strategy (2024); National Quantum Initiative (quantum.gov); (2) padrões técnicos oficiais – NIST FIPS 203, 204 e 205 (2024); (3) relatórios de institutos com governança transparente – RAND Corporation, MERICS, SIPRI; (4) publicações científicas indexadas em periódicos de alto impacto; (5) documentos de agências governamentais brasileiras – EMBRAPII (2023) e FAPESP (2024).

A análise comparativa de investimentos utiliza dados de fontes com metodologia explícita, aplicando o princípio de triangulação destacado por COLLIER (2011). A análise de conteúdo dos documentos estratégicos brasileiros (Decretos nº 12.725/2025 e nº 12.573/2025) e internacionais (NSM-10; NATO Quantum Strategy) segue procedimentos estabelecidos por BARDIN (2011). O recorte temporal opera em dois planos complementares. Os dados quantitativos de investimento e de produção científica cobrem o período de 2019 a 2024, limite dos últimos exercícios fiscais e das bases bibliométricas consolidadas à época da pesquisa. A análise documental estende-se até 2025 para incorporar os atos normativos que constituem a variável dependente do estudo – os Decretos nº 12.725/2025 (PND/END/LBDN) e nº 12.573/2025 (E-Ciber) e o relatório SIPRI (2025) –, sem os quais a resposta institucional brasileira à corrida quântica não poderia ser rastreada. Trata-se, portanto, de extensão deliberada do horizonte documental, e não de inconsistência do recorte: os quadros de investimento permanecem circunscritos a 2024, ao passo que os quadros de marcos normativos (Quadros 4 e 7) alcançam 2025. Reconhecem-se limitações relevantes: dados sobre investimentos chineses apresentam significativa margem de incerteza documentada pela RAND (PARKER et al., 2022); dados brasileiros encontram-se fragmentados entre múltiplas agências; e parte dos investimentos militares permanece classificada em todos os países.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados organizados em cinco subseções: panorama global de investimentos; capacidades tecnológicas por domínio; posicionamento estratégico do Brasil; implicações para a defesa nacional; e síntese dos cinco mecanismos causais identificados. Todas as fontes utilizadas são documentos governamentais, relatórios institucionais verificáveis ou artigos científicos indexados.

4.1 Panorama Global dos Investimentos em Tecnologias Quânticas (2019-2024)

A análise dos investimentos globais constitui ponto de partida para compreender as assimetrias estruturais que condicionam o posicionamento estratégico dos Estados. O relatório RAND (PARKER et al., 2022) é a avaliação comparativa mais abrangente disponível, documentando que EUA e China produzem muito mais pesquisa científica pública e patenteamento em tecnologias quânticas do que qualquer outra nação. O National Quantum Initiative Act dos EUA, aprovado em dezembro de 2018, criou estrutura de coordenação interagências com autorização inicial de US$ 1,2 bilhão. Os gastos federais em P&D em informação quântica evoluíram de US$ 456 milhões (FY2019) para US$ 1,04 bilhão (FY2022), US$ 1,04 bilhão (FY2023) e US$ 1,01 bilhão (FY2024), totalizando aproximadamente US$ 5,1 bilhões no período 2019-2024 (NSTC, 2024). A opacidade dos dados chineses impede comparações precisas: a RAND documenta estimativas que variam entre US$ 4 bilhões e US$ 15 bilhões em investimentos públicos acumulados.

4.1.1 Investimentos Governamentais: Dados de Fontes Verificadas

O Quadro 1 consolida os investimentos disponíveis em fontes verificáveis, com as respectivas margens de incerteza.

Quadro 1 – Investimentos Governamentais em Tecnologias Quânticas por País/Região (2019-2024)

País/Região	Investimento público (estimativa)	Fonte principal	Grau de incerteza
China	US$ 4-15 bilhões	RAND (2022); MERICS (2024)	Alto
União Europeia	> € 1 bi (Flagship) + nacionais	Quantum Flagship (COMISSÃO EUROPEIA, 2021)	Moderado
Estados Unidos	US$ 5 bi (2019-2024)	NQI Annual Report FY2025 (quantum.gov)	Baixo
Alemanha	> € 2 bilhões	MERICS (2024)	Moderado
Brasil (verificável)	R$ 91 mi (EMBRAPII + FAPESP)	EMBRAPII (2023); FAPESP (2024)	Baixo

Fonte: Adaptado de PARKER et al. (RAND, 2022), MERICS (2024), WHITE HOUSE (2022), EMBRAPII (2023) e FAPESP (2024)

O Quadro 1 evidencia as disparidades de investimento com as ressalvas metodológicas pertinentes. A principal conclusão de PARKER et al. (2022) é que, "por praticamente todas as métricas relevantes, os EUA e a China são claramente as duas nações líderes em ciência e tecnologia quântica". Para o Brasil, os R$ 91 milhões comprometidos por EMBRAPII e FAPESP representam o núcleo verificável dos investimentos públicos. A PND (BRASIL, 2025a) reconhece explicitamente que países que apenas absorvem tecnologias "tendem a exercer papel secundário no cenário mundial" – diagnóstico que se aplica diretamente ao posicionamento brasileiro em tecnologias quânticas.

4.1.2 Análise Detalhada do Caso Brasileiro: Iniciativas Verificadas

A análise dos investimentos brasileiros exige distinção entre o que é documentado publicamente e o que permanece sem consolidação. Os dados verificáveis apontam para três iniciativas principais: o Centro de Competência em Tecnologias Quânticas da EMBRAPII (R$ 60 milhões, out. 2023); o programa QuTIa da FAPESP (R$ 31 milhões, dez. 2024); e a Rede IATQ do Programa PRÓ-DEFESA V (CAPES e Ministério da Defesa, processo 88887.961681/2024-00), que reúne mais de 100 pesquisadores de 41

instituições em torno de IA e tecnologias quânticas aplicadas à defesa. O Quadro 2 apresenta essas iniciativas com suas fontes verificáveis.

Quadro 2 – Iniciativas Brasileiras em Tecnologias Quânticas com Dados Verificáveis (2022-2024)

Iniciativa	Instituição gestora	Valor / escopo	Ano	Fonte verificável
Centro de Competência em TQ	EMBRAPII / Senai Cimatec (Salvador)	R$ 60 milhões	2022-2023	EMBRAPII (out. 2023)
Programa QuTIa	FAPESP	R$ 31 mi / 5 anos	2024-2029	FAPESP (dez. 2024)
Rede IATQ – PRÓ-DEFESA V	IME / ECEME (liderança)	41 inst.; >100 pesquisadores	2024-	CAPES; MD (proc. 88887.961681/2024-00)
Rede Hermes Quântica	Exército Brasileiro	Valor não divulgado	Em andamento	Informação pública oficial
PDI-DQBRN, CMLabIME, QUANTUM II	FINEP / IME e parceiros	Projetos 1545-22; 0160-22; 3310-24	2022-2024	FINEP (editais verificáveis)

Fonte: Adaptado de EMBRAPII (2023), FAPESP (2024), CAPES e MINISTÉRIO DA DEFESA (2024)

O Quadro 2 revela que o Brasil possui um ecossistema de iniciativas mais amplo do que frequentemente reconhecido nos documentos de política científica, incluindo a articulação estratégica da Rede IATQ que conecta Academia, Forças Armadas e setor produtivo. Contudo, a dispersão institucional persiste: as iniciativas operam sem órgão coordenador nacional, sem documento estratégico unificado específico para tecnologias quânticas e sem cronograma de migração criptográfica equivalente ao estabelecido pelo NSM-10 para os sistemas federais norte-americanos (WHITE HOUSE, 2022). O padrão historicamente fraco de interação universidade-empresa no Brasil (RAPINI, 2007) impede que os recursos escassos fluam eficientemente para aplicações industriais e militares.

4.1.3 Mecanismo Causal 1: Efeito de Sinalização Estratégica

O Mecanismo 1 documenta como anúncios de mega-investimentos por potências líderes desencadeiam respostas em cadeia nos demais atores do sistema

internacional. Etapa 1 – Gatilho Inicial (2016-2018): A China anuncia Megaprojeto de Tecnologias Quânticas no 13° Plano Quinquenal e lança o satélite Micius em 2016, primeira demonstração global de QKD via satélite (KANIA; COSTELLO, CNAS, 2018). Etapa 2 – Resposta norte-americana (2018): National Quantum Initiative Act aprovado, autorizando US$ 1,2 bilhão (WHITE HOUSE, 2022). Etapa 3 – Resposta europeia (2018-2020): Quantum Flagship com € 1 bilhão. Etapa 4 – Institucionalização na OTAN (2023-2024): aprovação da Quantum Technologies Strategy, formalizando as tecnologias quânticas como "elemento de competição estratégica" (NATO, 2024). Etapa 5 – Mobilização brasileira (2022-2025): EMBRAPII (2023), FAPESP (2024), Rede IATQ (2024), PND/END (Decreto 12.725/2025) e E-Ciber (Decreto 12.573/2025) – com defasagem temporal de 4 a 6 anos e recursos substancialmente inferiores.

A resposta brasileira, embora tardia, está em aceleração: a incorporação da computação quântica na PND de 2025 e na E-Ciber de 2025 indica reconhecimento governamental crescente do tema. A lacuna crítica permanece entre o reconhecimento normativo e a tradução em estratégia operacional com recursos, cronogramas e metas verificáveis.

4.1.4 Produção Científica: Indicador de Capacidade

O relatório RAND (PARKER et al., 2022) documenta que EUA e China são os líderes em publicações científicas e patentes em tecnologias quânticas. O MERICS (2024) especifica que, em comunicações quânticas, a China lidera em implantações operacionais. O Quadro 3 sintetiza a distribuição de liderança científica por domínio.

O Quadro 3 revela especialização estratégica: EUA lideram impacto científico em computação quântica; China domina comunicações quânticas e patenteamento. O RAND (PARKER et al., 2022) adverte que o volume de patentes chinesas deve ser interpretado com cautela. A posição marginal do Brasil em todas as métricas reforça a dependência estrutural de importação de conhecimento e componentes, analisada no Mecanismo 3.

Quadro 3 – Liderança em Produção Científica por Domínio Quântico (2019-2024)[I]

Domínio	Líder em publicações	Segundo colocado	Posição Brasil	Fonte
Computação quântica	EUA	China	Marginal	RAND (2022)
Comunicações quânticas	China	EUA	Marginal	MERICS (2024)
Sensoriamento quântico	EUA / China (paridade)	Alemanha	Marginal	SIPRI (2025)
Patentes (volume total)	China (>50%)	EUA	< 0,5%	RAND (2022)

Fonte: Adaptado de PARKER et al. (RAND, 2022), MERICS (2024) e SIPRI (2025)

4.2 Capacidades Tecnológicas e Aplicações de Defesa: Análise por Domínio

As disparidades de investimento documentadas na subseção anterior traduzem-se em assimetrias concretas de capacidade tecnológica. O relatório SIPRI (2025) sintetiza que as tecnologias quânticas estão transitando de pesquisa experimental para aplicações estratégicas de defesa, "alterando fundamentalmente como a informação é detectada, compartilhada e protegida". KRELINA e DÚBRAVČÍK (2023) aprofundam essa análise para os domínios aéreo e espacial, identificando aplicações quânticas emergentes em guerra eletrônica e criptoanálise. Os três domínios principais (computação, comunicações e sensoriamento quântico) possuem dinâmicas competitivas e implicações militares distintas, com relevância diferenciada para o contexto de defesa brasileiro.

4.2.1 Computação Quântica: Dados de Fontes Verificadas

Em computação quântica, o relatório RAND (PARKER et al., 2022) documenta que os EUA lideram o desenvolvimento de computadores de uso geral baseados em supercondutores, enquanto a China explora múltiplas abordagens tecnológicas em paralelo. Em testemunho perante a USCC (fevereiro de 2024), PARKER afirmou que "os

[I] Distribuição de liderança consolidada a partir dos dados bibliométricos e de patenteamento reportados até 2024 pelas fontes indicadas. O relatório RAND (PARKER et al., 2022) fornece a base comparativa de publicações e patentes; MERICS (2024) e SIPRI (2025) atualizam a posição relativa dos atores nos domínios de comunicações e sensoriamento.

EUA estão à frente da China em todas as tecnologias quânticas com maior potencial de vantagem operacional militar". O Quadro 4 registra marcos tecnológicos verificados por fontes institucionais.

Quadro 4 – Marcos Institucionais em Computação Quântica e Criptografia (2018-2025)[II]

Ano	Evento normativo ou tecnológico	Ator	País	Fonte institucional
2018	National Quantum Initiative Act aprovado	Congresso dos EUA	EUA	quantum.gov
2022	NSM-10: prazo 2035 para transição PQC	Casa Branca	EUA	WHITE HOUSE (2022)
2023	NATO aprova Quantum Technologies Strategy	OTAN	Aliança	NATO (2024[III])
2024	NIST publica FIPS 203, 204 e 205	NIST	EUA	NIST (2024)
2024	Rede IATQ – PRÓ-DEFESA V	CAPES / MD / IME	Brasil	CAPES; MD (2024)
2025	PND/END: quântica como tecnologia disruptiva	Governo Federal	Brasil	BRASIL (2025a)
2025	E-Ciber: quântica como tecnologia emergente prioritária	Governo Federal	Brasil	BRASIL (2025b)

Fonte: Adaptado de WHITE HOUSE (2022), NATO (2024), NIST (2024), BRASIL (2025a) e BRASIL (2025b)

O Quadro 4 revela dois conjuntos paralelos de marcos: os normativos internacionais (NSM-10, NATO Strategy, padrões NIST), que estabelecem cronogramas e metas operacionais concretas; e os brasileiros recentes (PND/END 2025, E-Ciber 2025, Rede IATQ 2024), que demonstram reconhecimento crescente do tema mas ainda sem equivalência operacional. A lacuna não é mais de reconhecimento – a PND de 2025 é explícita – mas de especificidade: falta um programa nacional quântico com metas, cronograma e orçamento equivalentes ao NSM-10.

4.2.2 Mecanismo Causal 2: Demonstrações Tecnológicas como Catalisadores

O Mecanismo 2 evidencia que demonstrações públicas de capacidades quânticas desencadeiam percepções de vulnerabilidade e respostas institucionais. O NSM-10 (WHITE HOUSE, 2022) cita explicitamente que "um computador quântico

[II] A China não figura neste Quadro por inexistência de documento normativo público equivalente aos listados (estratégia nacional de tecnologias quânticas, padrão técnico oficial ou memorando de segurança). O posicionamento chinês é analisado nos Quadros 1, 3 e 6.
[III] Aprovada em novembro de 2023 e publicada em janeiro de 2024. A referência bibliográfica segue o ano da publicação oficial (NATO, 2024).

suficientemente capaz poderia comprometer a criptografia de chave pública em sistemas de segurança nacional, não-militares e comerciais". A publicação dos padrões NIST em agosto de 2024 representa a conclusão de um processo iniciado em 2016. O próprio governo brasileiro reconheceu a dimensão criptográfica ao incluir na E-Ciber (BRASIL, 2025b) o incentivo ao "desenvolvimento de competências e de soluções em criptografia" e à "redução do débito tecnológico" em tecnologias emergentes. O Brasil não possui, porém, cronograma equivalente ao prazo 2035 do NSM-10 para seus sistemas de defesa.

4.2.3 Sensoriamento Quântico: Implicações para a Defesa Brasileira

O sensoriamento quântico é o domínio com implicações mais imediatas e específicas para a defesa brasileira, e também o menos discutido nos documentos de política nacionais. O relatório SIPRI (2025) documenta que magnetômetros quânticos para detecção de submarinos e giroscópios quânticos para navegação em ambientes *GPS-denied* estão entre as aplicações de maior maturidade tecnológica e impacto operacional. DEGEN et al. (2017) sistematizaram as capacidades físicas subjacentes a esses sensores, demonstrando sensibilidade ordens de magnitude superiores às tecnologias convencionais.

A conexão com a estratégia de defesa brasileira é direta e documental: a Estratégia Nacional de Defesa (BRASIL, 2025a) prioriza explicitamente o Submarino Convencionalmente Armado com Propulsão Nuclear (SCPN) como um dos projetos estruturantes da defesa nacional. O programa de submarinos nucleares constitui o maior investimento em um único sistema de defesa da história brasileira. Sensores quânticos adversariais capazes de detectar submarinos com precisão superior – tecnologia documentada pelo SIPRI (2025) como em desenvolvimento acelerado – representam ameaça direta ao pressuposto de dissuasão estratégica associado ao SCPN. A Estratégia Nacional de Defesa (BRASIL, 2025a) não menciona explicitamente essa ameaça, o que configura lacuna entre o reconhecimento normativo da PND

e a blindagem operacional dos programas estruturantes. O Quadro 5 sintetiza os principais domínios de aplicação do sensoriamento quântico e sua relevância para a defesa brasileira.

Quadro 5 – Sensoriamento Quântico: Aplicações Militares e Relevância para o Brasil

Aplicação	Capacidade quântica	Ameaça/oportunidade para o Brasil	Fonte
Detecção de submarinos	Magnetômetros quânticos de alta sensibilidade	Ameaça ao programa SCPN	SIPRI (2025); DEGEN et al. (2017)
Navegação *GPS-denied*	Giroscópios quânticos; acelerômetros quânticos	Oportunidade: operações na Amazônia e mar aberto	SIPRI (2025)
Vigilância de fronteiras	Gravímetros quânticos; sensores sísmicos quânticos	Oportunidade: vigilância amazônica e SIVAM/ SIPAM	SIPRI (2025)
Imageamento de subsolo	Sensores quânticos de campo gravitacional	Oportunidade: mapeamento de recursos estratégicos	SIPRI (2025)
Comunicações seguras (QKD)	Distribuição quântica de chaves	Oportunidade: proteção de C2 militar	WEHNER et al. (2018)

Fonte: Adaptado de SIPRI (2025), DEGEN et al. (2017), BRASIL (2025a) e WEHNER et al. (2018)

O Quadro 5 demonstra que o sensoriamento quântico oferece ao Brasil tanto ameaças críticas – sobretudo ao programa SCPN – quanto oportunidades específicas alinhadas às prioridades estratégicas nacionais: vigilância amazônica, defesa marítima e proteção de sistemas de comando e controle. O SIPRI (2025) ressalta que essas aplicações estão transitando de pesquisa experimental para implantações operacionais, o que torna o período 2025-2030 crítico para que o Brasil desenvolva capacidades de contra-medida e de uso ofensivo próprio.

4.2.4 Comunicações Quânticas: Liderança Chinesa Documentada

Em comunicações quânticas, a vantagem chinesa é a mais claramente documentada. O relatório MERICS (2024) descreve rede quântica operacional de mais de 10.000 quilômetros, dois satélites quânticos operacionais e integração espaço-

solo consolidada. O mesmo relatório documenta o anúncio, em janeiro de 2024, de rede sino-russa de 3.800 quilômetros conectando Moscou a Urumqi. A NATO (2024) reconhece esse desenvolvimento como ameaça potencial às comunicações da Aliança.

Quadro 6 – Infraestrutura de Comunicações Quânticas por Ator (2024)

País/Entidade	Infraestrutura existente	Status verificado	Fonte
China	Rede Nacional >10.000 km; 2 satélites	Operacional	MERICS (2024)
China-Rússia	Rede Moscou-Urumqi 3.800 km	Anunciada (jan. 2024)	MERICS (2024)
União Europeia	EuroQCI – em desenvolvimento	Fase de planejamento	NATO (2024)
Estados Unidos	Projetos de laboratório	Experimental	RAND (2022)
Brasil	Rede Hermes Quântica (Exército)	Estágio piloto	Informação pública oficial

Fonte: Adaptado de MERICS (2024), NATO (2024) e RAND (2022)

O Quadro 6 documenta a assimetria crítica: apenas a China possui rede quântica operacional de escala nacional e internacional. O MERICS (2024) conclui que a China está "posicionada para dominar as comunicações quânticas". Para o Brasil, que depende de comunicações criptografadas para coordenação das Forças Armadas em seus três domínios operacionais, a exclusão da arquitetura emergente de redes quânticas representa risco estratégico de longo prazo.

4.2.5 Mecanismo Causal 3: Cascata de Dependência Tecnológica

O Mecanismo 3 revela como lacunas de capacidade tecnológica criam vulnerabilidades estratégicas cumulativas. O relatório RAND (PARKER et al., 2022) documenta que componentes críticos – dilution refrigerators, detectores de fótons únicos, lasers especializados – são produzidos por escassos fornecedores em países desenvolvidos. O MERICS (2024) registra que a China desenvolveu, em fevereiro de 2024, seu próprio dilution refrigerator (EZ-Q Fridge) para eliminar dependência de fornecedores ocidentais após restrições de exportação. O Brasil não possui capacidade análoga. O NSM-10 (WHITE HOUSE, 2022) exige que os EUA "priorizem a transição

oportuna de sistemas criptográficos para criptografia resistente a quantum até 2035". O Brasil, sem cronograma equivalente, enfrenta janela de vulnerabilidade crescente em seus sistemas de C2 militar.

4.3 Posicionamento Estratégico do Brasil: Análise com Base em Documentos Governamentais

As evidências reunidas nas subseções anteriores permitem uma avaliação integrada do posicionamento estratégico brasileiro, ancorada agora nos dois principais documentos governamentais recentes: o Decreto nº 12.725/2025 (PND/END/LBDN) e o Decreto nº 12.573/2025 (E-Ciber). Esses documentos representam avanço normativo significativo em relação às versões anteriores, mas também revelam, por contraste com o NSM-10 e a NATO Quantum Strategy, as lacunas que persistem entre reconhecimento e estratégia operacional.

4.3.1 Análise SWOT com Base em Documentos Governamentais Verificados

A matriz SWOT a seguir ancora-se exclusivamente em fatos verificáveis em fontes governamentais e relatórios institucionais, incorporando os dois decretos brasileiros de 2025.

Quadro 7 – Análise SWOT do Brasil em Tecnologias Quânticas (fontes governamentais verificadas)

FORÇAS – fontes verificadas	FRAQUEZAS – fontes verificadas
PND/END 2025 reconhece quântica como tecnologia disruptiva estratégica (BRASIL, 2025a)	Sem cronograma de migração PQC nos sistemas de defesa equivalente ao NSM-10
E-Ciber 2025 incorpora quântica e redução de dependência tecnológica (BRASIL, 2025b)	PND 2025 identifica quântica, mas sem estratégia operacional específica para Defesa
Rede IATQ: 41 instituições, >100 pesquisadores (CAPES; MD, 2024)	Investimentos R$ 91 mi verificáveis vs. bilhões das potências líderes
EMBRAPII R$ 60 mi e FAPESP R$ 31 mi (QuTIa) verificados	Dependência de componentes críticos importados (RAND, 2022)
Programa SCPN como motivação estratégica para sensoriamento quântico (END 2025)	Fragmentação institucional: sem órgão coordenador central

Fonte: Adaptado de BRASIL (2025a), BRASIL (2025b), CAPES e MINISTÉRIO DA DEFESA (2024), EMBRAPII (2023), FAPESP (2024) e RAND (2022)

Quadro 8 – SWOT: Oportunidades e Ameaças (fontes verificadas)

OPORTUNIDADES – fontes verificadas	AMEAÇAS – fontes verificadas
Padrões NIST FIPS 203/204/205 (2024) de acesso público e gratuito	Vulnerabilidade criptográfica: RSA e curva elíptica em todos os sistemas de defesa
NATO Transatlantic Quantum Community aberta a parceiros (NATO, 2024)	Sensores quânticos adversariais ameaçam dissuasão estratégica do SCPN (SIPRI, 2025)
E-Ciber 2025 prevê redução de déficit tecnológico em tecnologias emergentes	Rede sino-russa de comunicações quânticas operacional (MERICS, 2024)
Rede IATQ como estrutura de coordenação já existente (41 instituições)	China eliminando dependência de componentes ocidentais (EZ-Q Fridge – MERICS, 2024)
ONU – Ano Internacional da Ciência Quântica 2025 (QUANTUM 2025)	Controles de exportação de componentes críticos já em vigor (RAND, 2022)

Fonte: Adaptado de BRASIL (2025a), BRASIL (2025b), NIST (2024), NATO (2024), SIPRI (2025), MERICS (2024) e RAND (2022)

Os quadros 7 e 8 demonstra que os decretos brasileiros de 2025 transformaram parcialmente o quadro de forças: o Brasil passou a ter reconhecimento normativo explícito das tecnologias quânticas na PND e na E-Ciber. Contudo, o contraste com o NSM-10 permanece fundamental: enquanto o documento norte-americano estabelece inventário obrigatório de sistemas vulneráveis, cronograma até 2035 e órgão coordenador (ONCD), os decretos brasileiros reconhecem a importância do tema sem traduzir esse reconhecimento em metas operacionais mensuráveis.

4.3.2 Mecanismo Causal 4: Fragmentação Institucional

O Mecanismo 4 identifica como a ausência de coordenação nacional dissipa recursos escassos. O contraste com o modelo dos EUA é documentado pelo NSM-10 (WHITE HOUSE, 2022), que criou estrutura interagências coordenada pelo OSTP e o ONCD, com obrigação de inventário anual de sistemas vulneráveis. A NATO (2024) estabeleceu a Transatlantic Quantum Community como plataforma de coordenação entre 22 Aliados e seis parceiros. No Brasil, a Rede IATQ representa o esforço de coordenação mais amplo já realizado – 41 instituições, mais de 100 pesquisadores –, mas opera dentro do Programa PRÓ-DEFESA V, sem mandato de

política pública equivalente ao OSTP. A END 2025 (BRASIL, 2025a) não estabelece mecanismo coordenador específico para tecnologias quânticas, apesar de reconhecê-las como disruptivas. O vácuo entre o reconhecimento normativo (PND/END 2025) e a coordenação operacional de uma estratégia quântica de defesa configura o ponto crítico a ser endereçado.

4.4 Implicações Estratégicas para a Defesa Brasileira

Os mecanismos causais identificados convergem para implicações concretas e urgentes para a defesa nacional. O SIPRI (2025) sintetiza que as tecnologias quânticas estão "alterando fundamentalmente como a informação é detectada, compartilhada e protegida". Dois eixos são examinados: a vulnerabilidade criptográfica imediata e os cenários prospectivos de médio prazo.

4.4.1 Vulnerabilidade Criptográfica: Análise com Base em Documentos Governamentais

O NSM-10 (WHITE HOUSE, 2022) estabelece que computadores quânticos suficientemente capazes "poderiam comprometer a criptografia de chave pública, incluindo RSA e criptografia de curva elíptica", que constituem a espinha dorsal dos sistemas de comunicação militar convencional. O NIST publicou em agosto de 2024 os padrões FIPS 203 (ML-KEM), FIPS 204 (ML-DSA) e FIPS 205 (SLH-DSA) – referencial técnico de acesso público para a transição (NIST, 2024). A E-Ciber (BRASIL, 2025b) incorporou o incentivo ao "desenvolvimento de competências e de soluções em criptografia" como ação estratégica, mas sem o cronograma de migração que o NSM-10 determina para os EUA. O Brasil não possui programa equivalente de migração para seus sistemas de defesa, apesar de os padrões técnicos necessários estarem disponíveis gratuitamente.

4.4.2 Cenários Prospectivos para o Brasil (2025-2035)

Com base nos documentos governamentais analisados, o Quadro 8 delineia quatro cenários para o Brasil, tendo como referência o horizonte 2035 estabelecido

pelo NSM-10 (WHITE HOUSE, 2022) e os marcos normativos domésticos recentes (BRASIL, 2025a; 2025b).

Quadro 9 – Cenários Prospectivos para o Brasil em Tecnologias Quânticas (2025-2035)

Cenário	Condição de ativação	Situação esperada em 2035	Implicação para a defesa
Status Quo	Manutenção dos decretos sem tradução operacional	Sem migração PQC nos sistemas de defesa; dependência total de fornecedores externos	Sistemas de C2 vulneráveis; SCPN com risco crescente de detecção
Aproveitamento Normativo	Criação de programa quântico derivado dos Decretos 12.725 e 12.573/2025	Adoção dos padrões NIST nos sistemas de defesa; Rede IATQ institucionalizada	Redução da vulnerabilidade criptográfica nos sistemas prioritários
Estratégia Nacional	Publicação de estratégia nacional de tecnologias quânticas para defesa	Autonomia em domínios prioritários (PQC, sensoriamento); parceria na NATO TQC	Capacidade autônoma em criptografia e sensoriamento amazônico e marítimo
Liderança Regional	Investimento estruturado e integração Academia-FA-indústria sustentada	Liderança regional na América Latina; capacidade de exportar soluções quânticas	Projeção de poder tecnológico regional; influência em foros multilaterais de defesa

Fonte: Adaptado de WHITE HOUSE (2022), NIST (2024), NATO (2024), BRASIL (2025a) e BRASIL (2025b)

O Quadro 9 demonstra que o cenário de "Aproveitamento Normativo" – de menor custo e maior imediato – é viabilizado pelos decretos brasileiros de 2025 e pela disponibilidade gratuita dos padrões NIST: não requer novo documento estratégico, apenas a tradução das diretrizes existentes em programa operacional com metas e orçamento. A Rede IATQ já fornece a estrutura de pesquisa; falta a ponte para aplicação em sistemas de defesa com cronograma definido.

4.4.3 Mecanismo Causal 5: Ciclo de Marginalização Tecnológica

O Mecanismo 5 captura a dinâmica sistêmica que perpetua posição periférica, documentada em sete etapas auto-reforçadoras: (1) investimento insuficiente; (2) infraestrutura e capital humano limitados; (3) publicações e patentes marginais (<1% global, conforme RAND, 2022); (4) exclusão de colaborações estratégicas internacionais;

(5) emigração de talentos; (6) ecossistema privado fraco; (7) justificativa política para subinvestimento, retornando à etapa 1. A PND de 2025 (BRASIL, 2025a) reconhece implicitamente essa dinâmica ao advertir que países que apenas absorvem tecnologias "tendem a exercer papel secundário no cenário mundial".

A NATO (2024) oferece indiretamente um mecanismo de ruptura: a *Transatlantic Quantum Community* está aberta a "parceiros", não apenas Aliados. A Rede IATQ, ao reunir 41 instituições e mais de 100 pesquisadores, constitui a infraestrutura humana necessária para romper o ciclo – mas precisa ser complementada por decisão política que traduza o reconhecimento normativo dos Decretos 12.725 e 12.573/2025 em programa operacional com recursos, metas e cronograma verificáveis.

4.5 Síntese Analítica: Os Cinco Mecanismos Causais

A aplicação do método de *process tracing* com base exclusiva em fontes governamentais verificáveis revelou cinco mecanismos causais inter-relacionados. O Mecanismo 1 (Sinalização Estratégica) documenta defasagem de 4 a 6 anos na resposta brasileira, parcialmente reduzido pelos Decretos 12.725 e 12.573/2025. O Mecanismo 2 (Demonstrações como Catalisadores) evidencia que a E-Ciber (2025) incorporou o tema criptográfico quântico, mas sem o cronograma operacional do NSM-10. O Mecanismo 3 (Cascata de Dependência) revela vulnerabilidade crescente em componentes críticos documentada pela RAND (2022). O Mecanismo 4 (Fragmentação Institucional) contrasta a Rede IATQ – estrutura promissora – com a ausência de mandato coordenador equivalente ao OSTP norte-americano. O Mecanismo 5 (Ciclo de Marginalização) identifica na PND de 2025 o reconhecimento governamental do problema, mas ainda sem o programa operacional que quebraria a dinâmica.

Em conjunto, os cinco mecanismos demonstram que a questão brasileira em tecnologias quânticas não é mais de reconhecimento – os Decretos 12.725 e 12.573/2025 documentam esse reconhecimento – mas de tradução operacional. A distância entre norma e estratégia é o ponto crítico que diferencia o posicionamento brasileiro dos EUA e da OTAN.

Figura 1 – Encadeamento causal dos mecanismos de influência da corrida internacional por tecnologias quânticas na estratégia de defesa brasileira



Fonte: Autores (2026)

5 CONCLUSÃO

Este estudo analisou a influência da corrida internacional por tecnologias quânticas na formulação da estratégia de defesa brasileira, utilizando *process tracing* com base exclusiva em documentos governamentais e relatórios institucionais verificáveis. A análise revelou disparidades massivas de investimento – EUA e China produzem muito mais pesquisa e patenteamento em tecnologias quânticas do que qualquer outra nação (RAND, 2022) – e identificou cinco mecanismos causais que traduzem essas disparidades em implicações estratégicas concretas para o Brasil.

Um avanço normativo significativo ocorreu no período recente: a Política Nacional de Defesa (Decreto nº 12.725/2025) reconhece explicitamente a computação quântica

como tecnologia disruptiva que "acentua as assimetrias na área da Defesa" (BRASIL, 2025a); e a Estratégia Nacional de Cibersegurança (Decreto nº 12.573/2025) inclui a computação quântica entre as tecnologias emergentes prioritárias para redução da dependência tecnológica (BRASIL, 2025b). A Rede IATQ, vinculada ao PRÓ-DEFESA V (CAPES; MD, 2024), representa um avanço na articulação da pesquisa brasileira neste domínio, ainda que sua efetividade dependa da continuidade e da coordenação dos esforços. Esses movimentos indicam um posicionamento potencialmente distinto do período anterior a 2024, mas cujo impacto real está por ser demonstrado.

A lacuna crítica que persiste não é mais de reconhecimento, mas de operacionalização. O NSM-10 (WHITE HOUSE, 2022) estabelece inventário obrigatório de sistemas vulneráveis, cronograma até 2035 e órgão coordenador com mandato claro; a NATO Quantum Strategy (2024) define metas coletivas e plataforma de coordenação com 22 Aliados e seis parceiros. Os equivalentes brasileiros ainda não existem. O programa SCPN – prioridade central da END 2025 – é diretamente ameaçado por magnetômetros quânticos de detecção submarina documentados pelo SIPRI (2025), sem que haja programa nacional de contra-medidas quânticas ou de proteção ativa do pressuposto de dissuasão associado ao submarino nuclear.

As recomendações estratégicas derivadas desta análise incluem: (1) elaborar programa nacional de migração para criptografia pós-quântica nos sistemas de defesa, adotando os padrões NIST FIPS 203, 204 e 205 (2024) como referência, com cronograma até 2035 equivalente ao NSM-10; (2) converter a Rede IATQ em estrutura permanente de coordenação com mandato de política pública, complementando os Decretos 12.725 e 12.573/2025 com metas operacionais verificáveis; (3) desenvolver programa prioritário de sensoriamento quântico para vigilância amazônica, defesa marítima e proteção do SCPN, aproveitando as plataformas do SIPAM e do Sistema de Vigilância Amazônica; (4) buscar participação como parceiro na NATO Transatlantic Quantum Community, disponível para países não-membros da Aliança; (5) garantir continuidade orçamentária dos projetos FINEP (PDI-DQBRN/1545-22, CMLabIME/0160-22 e

QUANTUM II/3310-24) como núcleo de capacitação tecnológica verificável.

Conclui-se que o Brasil realizou em 2025 avanços normativos relevantes, reconhecendo governamentalmente o papel estratégico das tecnologias quânticas na defesa. A janela que se abre agora é a de traduzir esse reconhecimento em programa operacional concreto. Os instrumentos técnicos – padrões NIST disponíveis gratuitamente, relatórios RAND e SIPRI de acesso público, Rede IATQ já estruturada – estão disponíveis. A decisão política de utilizá-los é o único insumo que, neste momento, permanece ausente.

REFERÊNCIAS

BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.

BEACH, D.; PEDERSEN, R. B. **Process-tracing methods: foundations and guidelines**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2013.

BENNETT, A.; CHECKEL, J. T. (ed.). **Process tracing**: from metaphor to analytic tool. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

BRASIL. **Decreto nº 12.573, de 4 de agosto de 2025**. Institui a Estratégia Nacional de Cibersegurança – E-Ciber. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 ago. 2025, ed. 146, seção 1, p. 2. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/decreto/d12573.htm. Acesso em: 20 jun. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 12.725, de 18 de novembro de 2025**. Aprova a Política Nacional de Defesa, a Estratégia Nacional de Defesa e o Livro Branco de Defesa Nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 nov. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/acesso-a-informacao/governanca/governanca-do-setor-de-defesa/decreto-no-12-725-de-18-de-novembro-de-2025-dou_lbdn.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior; MINISTÉRIO DA DEFESA. **Programa PRÓ-DEFESA V** – Rede de Pesquisa sobre Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas em proveito da Defesa (Rede IATQ). Processo nº 88887.961681/2024-00. Brasília: CAPES; MD, 2024.

COLLIER, D. Understanding *process tracing*. **PS: Political Science & Politics**, v. 44, n. 4, p. 823-830, 2011.

COMISSÃO EUROPEIA. **Quantum Flagship**: interim report. Bruxelas: CE, 2021. Disponível em: https://qt.eu/. Acesso em: 20 jun. 2026.

DEGEN, C. L.; REINHARD, F.; CAPPELLARO, P. **Quantum sensing**. Reviews of Modern Physics, v. 89, n. 3, p. 035002, 2017. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002.

DUNJKO, V.; BRIEGEL, H. J. Machine learning & artificial intelligence in the quantum domain: a review of recent progress. **Reports on Progress in Physics**, v. 81, n. 7, p. 074001, 2018. DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6633/aab406.

EMBRAPII – Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial. **Embrapii anuncia R$ 60 milhões para tecnologias quânticas**. Brasília: EMBRAPII, out. 2023. Disponível em: https://embrapii.org.br/. Acesso em: 20 nov. 2025.

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. **FAPESP lança programa QuTIa de tecnologias quânticas com R$ 31 milhões**. São Paulo: FAPESP, dez. 2024. Disponível em: https://agencia.fapesp.br/. Acesso em: 20 jun. 2026.

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

KANIA, E. B.; COSTELLO, J. **Quantum Hegemony?** China's Ambitions and the Challenge to U.S. Innovation Leadership. Washington: Center for a New American Security, set. 2018. Disponível em: https://www.cnas.org/publications/reports/quantum-hegemony. Acesso em: 20 jun. 2026.

KRELINA, M. Quantum technology for military applications. **EPJ Quantum Technology**, v. 8, n. 1, p. 24, 2021. https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y.

KRELINA, M.; DÚBRAVČÍK, D. Quantum technology for defence: what to expect for the air and space domains. **Transforming Joint Air & Space Power: The Journal of the JAPCC**, n. 35, 2023. Disponível em: https://www.japcc.org/articles/quantum-technology-for-defence/. Acesso em: 20 jun. 2026.

LETA, J.; MEIS, L. A profile of science in Brazil. **Scientometrics**, v. 35, n. 1, p. 33-44, 1996.

MERICS – Mercator Institute for China Studies. **China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up**. Berlim: MERICS, dez. 2024. Disponível em: https://merics.org/en/report/chinas-long-view-quantum-tech-has-us-and-eu-playing-catch. Acesso em: 20 jun. 2026.

NATO – North Atlantic Treaty Organization. **Summary of NATO's Quantum Technologies Strategy**. Bruxelas: NATO, 16 jan. 2024. Disponível em: https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm. Acesso em: 20 jun. 2026.

NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. **Quantum computation and quantum information**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

NIST – National Institute of Standards and Technology. **FIPS 203**: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard. Gaithersburg: NIST, 13 ago. 2024. Disponível em: https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/final.

NIST – National Institute of Standards and Technology. **FIPS 204**: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard. Gaithersburg: NIST, 13 ago. 2024. Disponível em: https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final.

NIST – National Institute of Standards and Technology. **FIPS 205**: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard. Gaithersburg: NIST, 13 ago. 2024. Disponível em: https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/final.

NSTC – National Science and Technology Council. **National Quantum Initiative Annual Report FY2025**. Washington: NSTC, Subcommittee on Quantum Information Science, 2024. Disponível em: https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2024/12/NQI-Annual-Report-FY2025.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

PARKER, E. et al. **An Assessment of the U.S. and Chinese Industrial Bases in Quantum Technology**. Santa Monica: RAND Corporation, fev. 2022. (RR-A869-1). Disponível em: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA869-1.html. Acesso em: 20 jun. 2026.

PARKER, E. **The Chinese Industrial Base and Military Deployment of Quantum Technologies**. Testemunho perante a U.S.-China Economic and Security Review Commission. Washington: RAND, fev. 2024. Disponível em: https://www.uscc.gov/sites/default/files/2024-02/Edward_Parker_Testimony.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

PIRANDOLA, S. et al. Advances in quantum cryptography. **Advances in Optics and Photonics**, v. 12, n. 4, p. 1012-1236, 2020. https://doi.org/10.1364/AOP.361502.

PRESKILL, J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. **Quantum**, v. 2, p. 79, 2018. https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79.

QUANTUM 2025. **International Year of Quantum Science and Technology**. Disponível em: https://quantum2025.org/. Acesso em: 20 jun. 2026.

RAPINI, M. S. **Interação universidade-empresa no Brasil**: evidências do Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq. Estudos Econômicos, v. 37, n. 1, p. 211-233, 2007.

SIPRI – Stockholm International Peace Research Institute. **Military and Security Dimensions of Quantum Technologies**: a primer. Elaborado por Michal Krelina. Estocolmo: SIPRI, jul. 2025. Disponível em: https://www.sipri.org/publications/2025/other-publications/military-and-security-dimensions-quantum-technologies-primer. Acesso em: 20 jun. 2026.

WALTZ, K. N. **Theory of international politics**. Reading: Addison-Wesley, 1979.

WEHNER, S.; ELKOUSS, D.; HANSON, R. Quantum internet: a vision for the road ahead. **Science**, v. 362, n. 6412, p. eaam9288, 2018. https://doi.org/10.1126/science.aam9288.

WENDT, A. **Social theory of international politics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

WHITE HOUSE – Office of the President of the United States. **National Security Memorandum 10 (NSM-10)**: Promoting United States Leadership in Quantum Computing While Mitigating Risks to Vulnerable Cryptographic Systems. Washington: White House, 4 mai. 2022. Disponível em: https://www.quantum.gov/security/. Acesso em: 20 nov. 2025.

XU, F. et al. Secure quantum key distribution with realistic devices. **Reviews of Modern Physics**, v. 92, n. 2, p. 025002, 2020. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.025002.

Autoria

1 Thays Felipe David de Oliveira

Mestre em Antropologia pela Universidade Federal da Paraíba; Especialista em Ciência Política e Graduada em Relações Internacionais pela Universidade Estadual da Paraíba; Doutora em Ciência Política pela Universidade Federal de Pernambuco; Pós-doutora em Engenharia Nuclear pelo Instituto Militar de Engenharia; Professora
https://orcid.org/0000-0002-7317-5704 • thays-felipe.oliveira@ufam.edu.br

2 Carlos Eduardo Franco Azevedo

Graduação em Administração pela Academia Militar das Agulhas Negras; Mestrado em Operações Militares pela Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais; Mestrado em Ciências Militares pela Escola de Comando e Estado Maior do Exército; Assessor de Planejamento Estratégico e Inovação da Escola de Comando e Estado-Maior do Exército; Doutor em Administração pela Fundação Getúlio Vargas; Professor
https://orcid.org/0000-0002-8021-0723 • francoazevedo@francoazevedo.com.br

3 Fernando Araújo-Moreira

Engenheiro de Materiais; Mestre e Doutor em Física; Professor Visitante e Cientista Pesquisador na Universidade de Maryland/EUA; Coordenador de Pesquisa SE7/ Engenharia Nuclear; Professor
https://orcid.org/0000-0002-5423-0405 • fernando.manuel@ime.eb.br

Como citar este artigo

OLIVEIRA, T. F. D.; AZEVEDO, C. E. F.; ARAÚJO-MOREIRA, F. Tecnologias quânticas como ativo estratégico: potências e a defesa do Brasil. **InterAção**, Santa Maria, v. 17, n. 3, e97841, p. 1-28, 2026. DOI 10.5902/2357797597841. Disponível em: https://dx.doi.org/10.5902/2357797597841. Acesso em: dia mês abreviado. ano.