UFSM

InterAção

ISSN 2357-7975
ACESSO ABERTO

IA., Santa Maria, v. 17, n. 3, e98673, p. 1-46, 2026 • https://dx.doi.org/10.5902/2357797598673
Submissão: 05/09/2026 • Aprovação: 14/09/2026 • Publicação: 02/10/2026

Artigos Dossiê

Tecnologias quânticas para defesa: análise e prospecção de soluções para o Exército

Quantum technologies for defense: analysis and foresight of solutions for the Army

Fernando Araújo-Moreira[I], Juraci Ferreira Galdino[I]
Carlos Eduardo Franco-Azevedo[II], Rômullo Girardi Moreira[I]

[I]Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
[I]Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo

As tecnologias quânticas de segunda geração têm se consolidado como um dos ramos de maior capacidade disruptiva do século XXI. Este artigo analisa a produção científica e tecnológica sobre essas tecnologias, com foco em sua aplicação na defesa. Para tal, utilizou-se abordagem quantitativa baseada em dados das bases Scopus e PATENTSCOPE, adotando taxonomias internacionalmente reconhecidas – relatório *Strategic Research and Industry Agenda* (SRIA 2030) for Quantum Technologies da iniciativa Quantum Flagship da Comissão Europeia, sistema de classificação da *Association for Computing Machinery* (ACM), taxonomia do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e categorização da Divisão de Ciência e Tecnologia da OTAN. Os resultados mostram que a produção científico-tecnológica em tecnologias quânticas, entre 2014 e 2024, apresentou crescimento expressivo, sobretudo após 2021, com liderança de China e EUA e participação modesta do Brasil. A produção científica da Índia cresce de forma destacada, principalmente na vertente da defesa. Semelhanças foram observadas nas áreas de pesquisa entre os cenários global e militar, com destaque para computação e comunicações quânticas. Quanto às áreas de aplicação, apesar da baixa representatividade da defesa, sua produção apresenta tendência de crescimento superior à do contexto global, sugerindo progressivo interesse no setor. As aplicações de tecnologias quânticas na defesa que mais recebem atenção são C4ISR (controle, comando, comunicações, computadores, inteligência, vigilância e reconhecimento) & apoio à decisão e hipersônica & espaço. A partir dessa análise, o estudo prospecta o desenvolvimento de soluções no contexto do Exército Brasileiro.

Palavras-chave: Tecnologias quânticas de segunda geração; Defesa; Prospecção tecnológica; Exército Brasileiro

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

Abstract

Second-generation quantum technologies have consolidated themselves as one of the most disruptive branches of the 21st century. This article analyzes the scientific and technological production on these technologies, focusing on their application in defense. To this end, a quantitative approach was adopted based on data from the Scopus and PATENTSCOPE databases, using internationally recognized taxonomies – the Strategic Research and Industry Agenda (SRIA 2030) for Quantum Technologies report of the Quantum Flagship initiative of the European Commission, the classification system of the Association for Computing Machinery (ACM), the taxonomy of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), and the categorization of the Science and Technology Division of NATO. The results show that the scientific-technological production on quantum technologies, between 2014 and 2024, presented significant growth, especially after 2021, led by China and the USA, with modest participation from Brazil. India's scientific production grows remarkably, particularly in the defense strand. Similarities were observed in the research areas between the global and military scenarios, with emphasis on quantum computing and quantum communications. Regarding application areas, despite the low representativeness of defense, its production presents a growth trend higher than the global context, suggesting a growing interest in the sector. The quantum technology applications in defense receiving the most attention are C4ISR (command, control, communications, computers, intelligence, surveillance and reconnaissance) & decision support and hypersonic & space. Based on this analysis, the study explores prospective solutions for the Brazilian Army.

Keywords: Second-generation quantum technologies; Defense; Technology foresight; Brazilian Army

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias quânticas de segunda geração têm se consolidado como um domínio estratégico e transversal no século XXI, com potencial disruptivo sobre computação, comunicações seguras, sensoriamento de alta precisão e navegação, com impactos diretos na economia, na segurança e na governança internacional (EUROPEAN COMMISSION, 2024). No domínio da defesa, essas tecnologias têm sido exploradas para aprimorar capacidades em comunicações resilientes e sigilosas, detecção e rastreamento de alvos, navegação em ambientes contestados e quebra ou reforço de esquemas criptográficos, reconfigurando a maneira como as Forças Armadas planejam, conduzem e protegem operações em tempos de paz e de guerra (KRELINA, 2021; KRELINA, 2025).

A crescente complexidade dos conflitos modernos, caracterizados por ambientes híbridos e uso intensivo de tecnologias emergentes, exige que os países

invistam em inovação para manter sua soberania e capacidade dissuasória (GIRARDI; GALDINO; PELLANDA, 2024). Nesse contexto, a quântica surge como ferramenta crítica para fortalecer a superioridade informacional, a velocidade de resposta e a eficiência operacional das forças militares (RALEGANKAR et al., 2022). Um fato que atesta a relevância das tecnologias quânticas no contexto da defesa é a sua recente inclusão como área tecnológica prioritária na nova estratégia americana para o desenvolvimento de capacidades militares (SWAYNE, 2025).

Embora haja crescente produção sobre tecnologias quânticas, ainda são limitados os estudos que integrem indicadores científicos e tecnológicos para analisar sua evolução no setor de defesa e identificar oportunidades para o contexto brasileiro. Nesse sentido, este artigo investiga a produção científica e tecnológica em tecnologias quânticas, com ênfase em sua aplicação no setor de defesa. Para tanto, adota uma abordagem quantitativa baseada em publicações acadêmicas (Scopus) e patentes (PATENTSCOPE), empregando taxonomias internacionais consolidadas para classificação de tecnologias quânticas e aplicações de defesa.

O objetivo principal do estudo é diagnosticar a produção científica e tecnológica em tecnologias quânticas de segunda geração na defesa e, a partir disso, prospectar áreas prioritárias de aplicação para o Exército Brasileiro. Nesse esforço de prospecção, exploram-se possíveis desdobramentos das tecnologias identificadas à luz de soluções observadas em conflitos contemporâneos (como na Ucrânia, Israel, Índia e Paquistão) e iniciativas nacionais recentes.

Dessa forma, o estudo contribui para: (i) apresentar um panorama atualizado da produção científica e tecnológica em tecnologias quânticas voltadas à defesa; (ii) identificar áreas tecnológicas promissoras; (iii) discutir potenciais aplicações militares futuras; e (iv) analisar o alinhamento entre os resultados obtidos e as capacidades e desafios institucionais do Exército Brasileiro.

Além desta introdução, o artigo está estruturado em seis seções: referencial teórico (Seção 2), metodologia (Seção 3), diagnóstico e prospecção (Seção 4), discussão (Seção 5) e conclusões (Seção 6).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Tecnologias quânticas de segunda geração e aplicações militares

2.1.1 Fundamentos, segunda revolução quântica e os quatro pilares

As tecnologias quânticas fundamentam-se na exploração de fenômenos característicos da mecânica quântica, como quantização, superposição, emaranhamento, tunelamento e interferência, para realizar tarefas de processamento de informação, comunicação e sensoriamento com desempenho potencialmente superior ao alcançável por sistemas clássicos (NIELSEN; CHUANG, 2000; SCHLEICH et al., 2016; DEGEN; REINHARD; CAPPELLARO, 2017). Embora a primeira revolução quântica, consolidada ao longo do século XX, tenha se centrado na formulação dos fundamentos da mecânica quântica e viabilizado inovações como o laser, os transistores, o GPS e os relógios atômicos (KRELINA, 2021; KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023), a denominada segunda revolução quântica caracteriza-se pela engenharia e pelo controle de estados quânticos individuais, abrindo caminho para novas tecnologias disruptivas (DOWLING; MILBURN, 2003; SCHLEICH et al., 2016; KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023; ARAÚJO-MOREIRA et al., 2024).

A literatura consensualmente organiza as tecnologias quânticas em quatro pilares (SCHLEICH et al., 2016; KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023; EUROPEAN COMMISSION, 2024; EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE, 2024). A computação quântica explora qubits (unidades de informação em superposição de estados) para executar algoritmos capazes de superar computadores clássicos em determinadas classes de problemas (DEUTSCH, 1985; NIELSEN; CHUANG, 2000; SHOR, 1997; GROVER, 1996). A simulação quântica emprega sistemas quânticos controlados para modelar fenômenos físicos e químicos complexos (FEYNMAN, 1982; LLOYD, 1996; SCHLEICH et al., 2016). As comunicações quânticas exploram propriedades fundamentais da mecânica quântica, como o teorema da não clonagem e o emaranhamento, para proporcionar elevados

níveis de segurança na transmissão de informações, viabilizando aplicações como a distribuição quântica de chaves e o teletransporte quântico (WOOTTERS; ZUREK, 1982; BENNETT; BRASSARD, 1984; EKERT, 1991; BENNETT et al., 1993; PIRANDOLA et al., 2020). Por fim, o sensoriamento e a metrologia quânticos exploram a sensibilidade de estados quânticos para realizar medições de alta precisão, com aplicações em navegação, sincronização e detecção (DEGEN; REINHARD; CAPPELLARO, 2017; GIOVANNETTI; LLOYD; MACCONE, 2011).

2.1.2 Aplicações militares das tecnologias quânticas de segunda geração

As tecnologias quânticas potencializam capacidades já existentes e essenciais às operações militares, como segurança cibernética, sensoriamento, logística e comunicações estratégicas (CHOI, 2023; KRELINA, 2021; 2025), reconfigurando a forma como as Forças Armadas planejam, conduzem e protegem operações em tempos de paz e de guerra (KRELINA, 2021; 2025).

Na computação quântica, as aplicações militares abrangem a otimização de logística e de mobilização, o processamento de grandes volumes de dados de inteligência, vigilância, aquisição de alvos e reconhecimento (domínio ISTAR), a identificação de padrões, o aprendizado de máquina e o apoio à decisão (KRELINA, 2021; CHOI, 2023; KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023; KRELINA, 2025). Embora os computadores quânticos atuais ainda operem na era NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*) e dependam de maior maturidade tecnológica para aplicações em larga escala (SCHLEICH et al., 2016; PRESKILL, 2018), sua capacidade potencial de comprometer sistemas criptográficos de chave pública confere à computação quântica caráter simultaneamente habilitador e disruptivo para a cibernética militar (GROVER, 1996; SHOR, 1997; KRELINA, 2021; 2025). Nesse contexto, a criptografia pós-quântica assume papel complementar e indispensável, especialmente diante da possibilidade de armazenamento de dados criptografados para futura decriptação por computadores quânticos mais avançados – estratégia representada pela frase *harvest now, decrypt later* (MOSCA, 2018; KRELINA, 2025).

Na simulação quântica, a relevância estratégica reside na aceleração de ciclos de desenvolvimento de materiais, componentes e sistemas militares (KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023). Entre as aplicações de interesse da defesa destacam-se a descoberta de materiais avançados (principalmente, dos chamados materiais *quânticos*), a modelagem molecular, o desenvolvimento de baterias e sistemas de armazenamento de energia e a otimização de combustíveis e propelentes para aplicações aeroespaciais e hipersônicas (FEYNMAN, 1982; LLOYD, 1996; SCHLEICH et al., 2016; KRELINA, 2025).

Nas comunicações quânticas, o potencial de proteção de redes de comando e controle e de infraestruturas críticas decorre da segurança física proporcionada pelas leis da mecânica quântica (KRELINA, 2021; KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023). A distribuição quântica de chaves (QKD), fundamentada em protocolos como o BB84 (BENNETT; BRASSARD, 1984), constitui uma de suas principais aplicações e já foi comprovada em redes experimentais e satelitais (PIRANDOLA et al., 2020; LIAO et al., 2018). A perspectiva de uma internet quântica capaz de integrar computadores e sensores distribuídos com segurança baseada em emaranhamento vem sendo desenvolvida em diferentes níveis de maturidade (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018).

No sensoriamento e na metrologia quânticos, reside a vertente com horizonte de emprego militar mais próximo, especialmente em ambientes nos quais os sistemas de posicionamento, navegação e tempo por satélite estejam degradados ou indisponíveis (KRELINA, 2021; 2025). Sensores baseados em interferometria atômica, magnetometria, gravimetria e relógios atômicos avançados vêm sendo testados para navegação independente de GNSS, detecção de variações magnéticas e gravitacionais, identificação de estruturas subterrâneas e submarinas e geração de referências de tempo de altíssima precisão (DEGEN; REINHARD; CAPPELLARO, 2017; GIOVANNETTI; LLOYD; MACCONE, 2011; CHEN et al., 2013; KRELINA, 2021; 2025). Radares quânticos baseados em superposição e emaranhamento são prospectados para a detecção de aeronaves furtivas e drones (CHEN et al., 2013; KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023).

2.2 Dimensões estratégica e institucional

As tecnologias quânticas transcendem sua dimensão estritamente científico-tecnológica, uma vez que capacidades em computação, comunicações, sensoriamento e metrologia podem produzir vantagens econômicas e militares assimétricas (KANIA, 2020; GIRARDI; GALDINO, 2024; KRELINA, 2025). Esse caráter estratégico explica por que a área de física (ou mecânica) quântica vem sendo progressivamente incorporada às políticas de segurança nacional, defesa, controle de exportações e proteção de tecnologias críticas das principais potências (KANIA, 2020; NATO, 2021; 2023; 2024; EUROPEAN COMMISSION, 2024). No Brasil, a incorporação dessas tecnologias à defesa tem sido analisada no âmbito do Exército Brasileiro e de suas ICTs, notadamente o IME, no contexto do Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação do Exército (SCTIEx) (SQUEFF, 2016; AZEVEDO et al., 2021; ARAÚJO-MOREIRA et al., 2024; COSTA; AZEVEDO; ARAÚJO-MOREIRA, 2025; OLIVEIRA et al., 2025; OLIVEIRA; AZEVEDO; ARAÚJO-MOREIRA, 2026). A formação de competências e a articulação institucional no âmbito do EB e do IME reforçam esse panorama (GIRARDI; FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2026).

Em síntese, o panorama apresentado evidencia que as quatro vertentes das tecnologias quânticas de segunda geração (computação, simulação, comunicações e sensoriamento & metrologia) apresentam aplicações de interesse militar, com distintos horizontes de maturação e distintos graus de aderência às necessidades operacionais contemporâneas. É com base nesse referencial que a Seção 4 examina a produção científica e tecnológica global e prospecta, para o Exército Brasileiro, caminhos concretos de incorporação dessas tecnologias, articulando-os às demandas evidenciadas em conflitos recentes e às iniciativas em curso no âmbito do EB e do IME.

3 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem quantitativa com o objetivo de mapear e analisar a produção científica e tecnológica relacionada à tecnologias quânticas, com

foco específico no setor de defesa. A metodologia está estruturada em duas frentes analíticas principais: (i) produção científica, baseada em dados da base Scopus; e (ii) produção tecnológica, baseada na plataforma PATENTSCOPE da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI).

3.1. Período de análise e critérios de inclusão

A janela temporal considerada abrange a década de 2014 a 2024. No caso da produção científica, foram excluídas erratas ou publicações retratadas. Na produção tecnológica, considerou-se o número bruto de depósitos de patentes, com atenção às limitações de atualização da base no último ano do período considerado (2024), como discutido em seções posteriores.

3.2. Taxonomias empregadas

Para garantir uma análise sistemática, padronizada e reprodutível, as seguintes taxonomias foram utilizadas como referência para a montagem das *strings* de busca (**Apêndice A**):

- **Para áreas de pesquisa em tecnologias quânticas:** quatro pilares considerados no relatório *Strategic Research and Industry Agenda (SRIA 2030) for Quantum Technologies* da iniciativa *Quantum Flagship* da Comissão Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2024) – computação quântica, simulação quântica, comunicações quânticas e sensoriamento & metrologia quânticos. Dessa forma, a estrutura composta por quatro tópicos foi alimentada com termos relacionados presentes no sistema de classificação da ACM (ACM, 2012) e na taxonomia da IEEE (IEEE, 2025).
- **Para áreas de aplicação de tecnologias quânticas no setor de defesa:** categorização em nove tópicos – robótica, biotecnologia, C4ISR (controle, comando, comunicações, computadores, inteligência, vigilância e reconhecimento) & apoio à decisão, transporte & logística, simulação,

hipersônica & espaço, saúde, novos materiais e cibernética – a partir dos temas considerados no relatório de tendências produzido pela Divisão de Ciência e Tecnologia da OTAN (NATO, 2023).

Essa dinâmica de categorização foi empregada para analisar tanto publicações científicas quanto registros de patentes, permitindo a comparação entre diferentes áreas temáticas e contextos de aplicação.

3.3. Procedimentos de coleta e análise dos dados

A coleta de dados foi realizada entre 10 e 19 de novembro de 2025, por meio de consultas às plataformas Scopus e PATENTSCOPE, utilizando *strings* de busca baseadas nos descritores das taxonomias mencionadas na seção anterior. Os termos de interesse foram pesquisados no título, resumo e palavras-chave das publicações científicas (Scopus). No caso das patentes, a pesquisa dos termos se deu na *front page* dos documentos, que reúne o título, resumo e dados gerais associados (PATENTSCOPE). Todas as *strings* de busca estão disponibilizadas no **Apêndice A**, de tal forma a garantir a reprodutibilidade do estudo. Os dados foram organizados em séries temporais e analisados quanto à distribuição geral, por país, por área de pesquisa e por setor de aplicação.

A análise dos dados culminou na etapa de prospecção tecnológica, na qual foram exploradas as áreas de maior relevância para aplicação da quântica na defesa. Essa fase fundamentou-se em soluções que estão sendo empregadas em conflitos contemporâneos (como na Ucrânia, Israel, Índia e Paquistão) e iniciativas nacionais recentes.

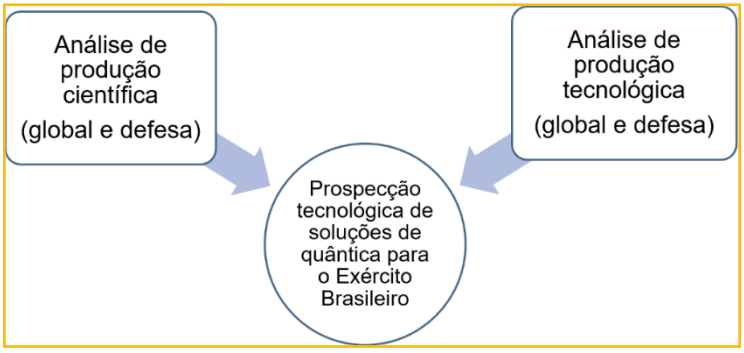
Essa análise ainda foi complementada pela projeção da produção por país até 2029, com base na Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR, do termo em inglês *Compound Annual Growth Rate*) (Seção 5.1) e pelas discussões sobre a participação relativa da defesa (Seção 5.2), do modelo de desenvolvimento da quântica (Seção

5.3) e do ciclo de vida (curvas-S) das áreas de pesquisa em quântica (Seção 5.4). Além disso, há uma discussão sobre aspectos geopolíticos relacionados ao acirramento da competição estratégica entre grandes potências por tecnologias emergentes e disruptivas, como as tecnologias quânticas (Seção 5.5).

4 DIAGNÓSTICO E PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Esta seção apresenta a análise da produção científica e tecnológica relacionada à quântica no período de 2014 a 2024, tanto em termos globais quanto com foco no setor de defesa. As análises foram estruturadas segundo quatro dimensões: volume de produção, distribuição por país, áreas de pesquisa e áreas de aplicação. A partir dessas evidências, foram identificadas as áreas mais promissoras para a prospecção tecnológica de soluções aplicáveis ao Exército Brasileiro. A Figura 1 ilustra a estrutura lógica da apresentação dos resultados, indicando a articulação entre as análises globais e setoriais e sua convergência para o esforço de prospecção.

Figura 1 – Estrutura da apresentação dos resultados



Fonte: Autores (2026)

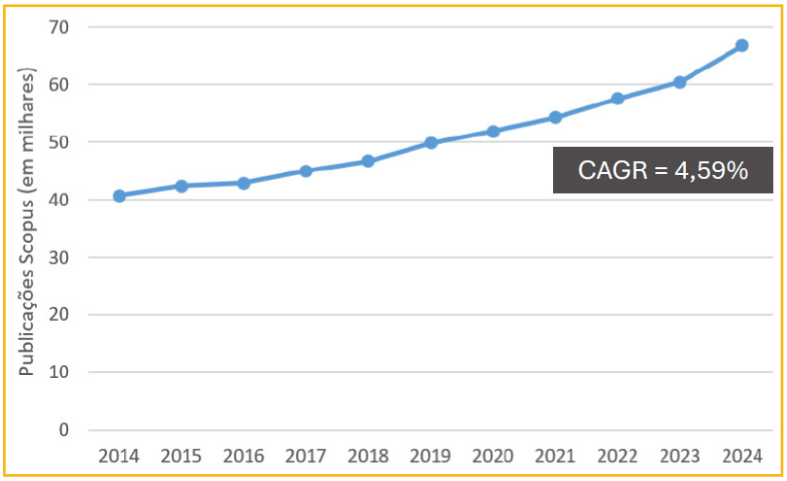
4.1. Produção científica

4.1.1. Análise global

A Figura 2 apresenta a evolução do número de publicações sobre tecnologias quanticas indexadas na base Scopus entre os anos de 2014 e 2024, expressa em

milhares. Observa-se um crescimento contínuo ao longo do período, com taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,59%.

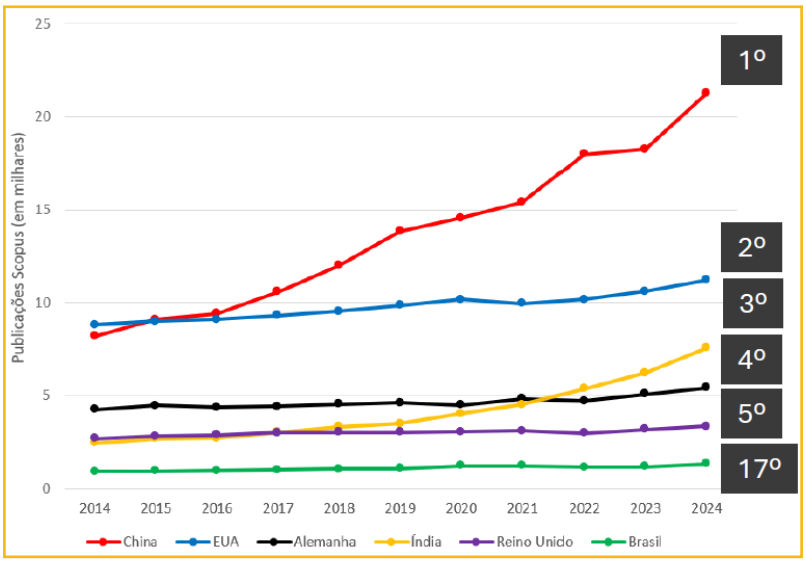
Figura 2 – Produção científica relacionada à quântica (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

Em relação à distribuição por país, a China lidera, seguida pelos Estados Unidos e pela Índia. A Alemanha e o Reino Unido completam o *ranking* dos cinco primeiros. O Brasil ocupa a 17ª posição, com crescimento constante, mas ainda bem abaixo das potências científicas em tecnologias quânticas (Figura 3).

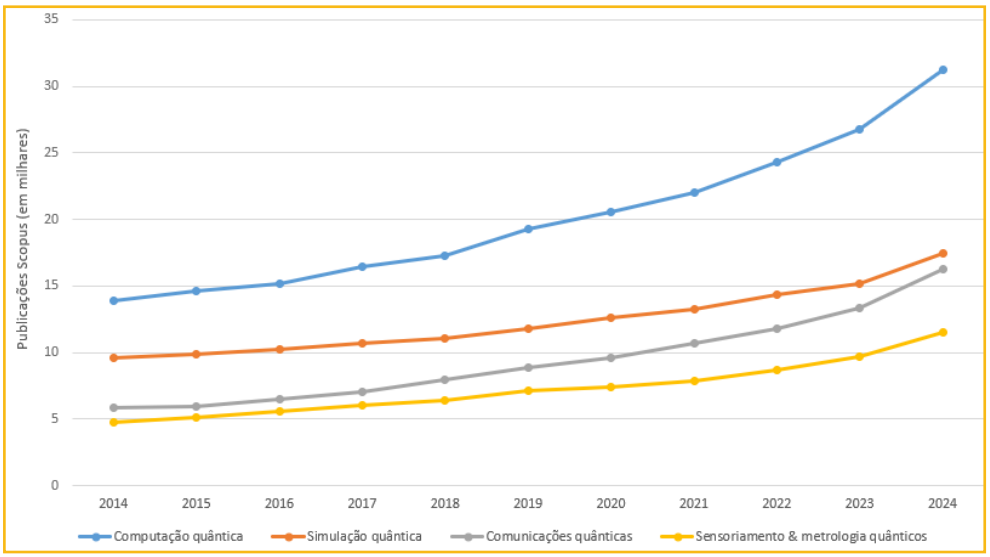
Figura 3 – Produção científica por país (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

Quanto às áreas de pesquisa, destaca-se a computação quântica, que concentra o maior número de publicações no período considerado (Figura 4).

Figura 4 – Produção científica por área de pesquisa (2014–2024)



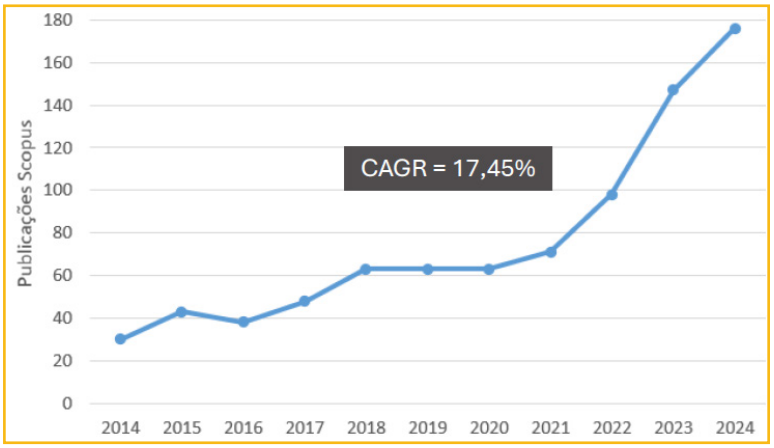
Fonte: Scopus (2026)

Em síntese, o panorama global evidencia forte concentração da produção em poucos países, já que China e EUA respondem por quase metade do total, com o Brasil em posição periférica, ainda que em crescimento constante.

4.1.2. Análise focada na defesa

A produção científica especificamente voltada à quântica na defesa também apresentou crescimento contínuo, com uma curva mais acentuada a partir de 2022 (Figura 5). A tendência de crescimento no período é expressa pela taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 17,45%.

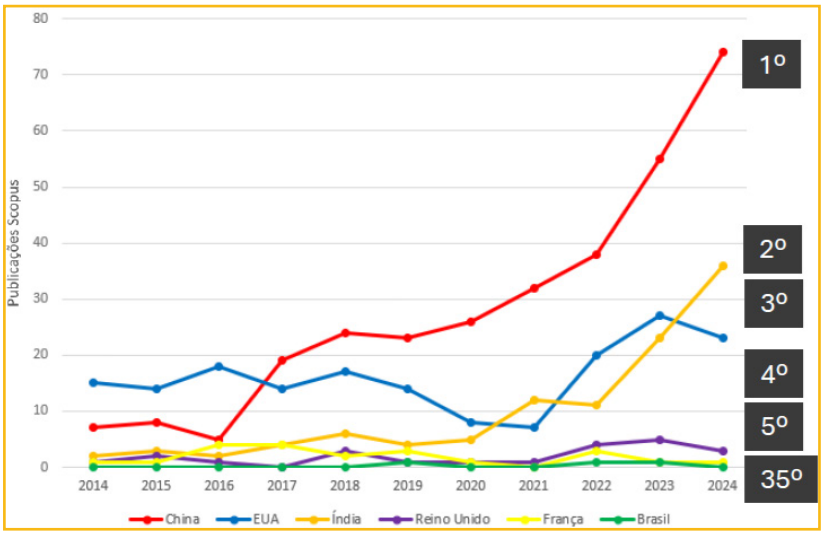
Figura 5 – Produção científica em quântica na defesa (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

China, EUA e Índia também lideram nesse domínio, seguidos de longe por Reino Unido e França. Salienta-se o salto de produção apresentado pela Índia na transição 2022-2024, assumindo a segunda colocação em termos de produção científica recente. O Brasil ocupa a 35ª posição no *ranking* mundial, indicando baixa participação acadêmica nessa área (Figura 6).

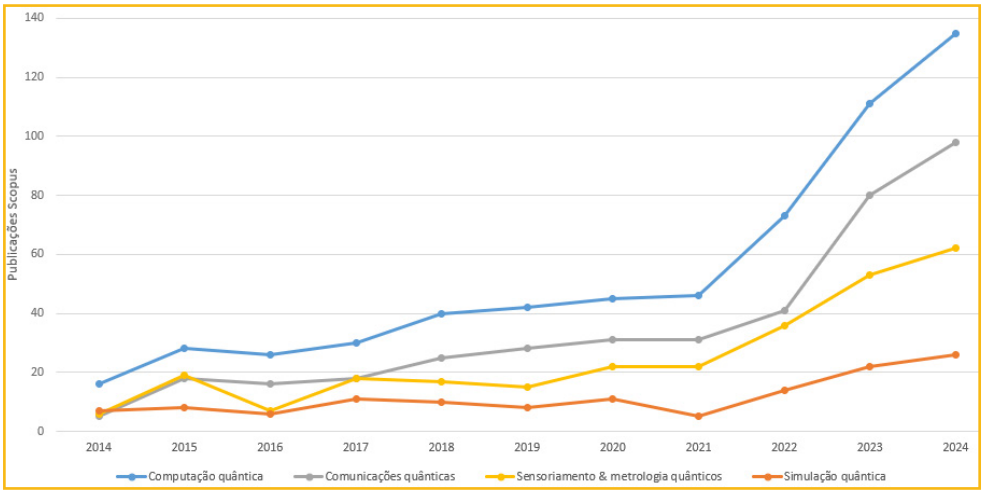
Figura 6 – Produção científica em quântica na defesa por país (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

As áreas de pesquisa mais frequentes na defesa seguem o padrão da análise global, com destaque para a computação quântica. No contexto militar, a área de comunicações quânticas também se mostra bastante presente na literatura, principalmente a partir de 2022 (Figura 7). No plano temático, a preponderância de computação e comunicações quânticas na literatura militar é coerente com o referencial teórico, que identifica nesses dois pilares (Seção 2.1.2) aplicações de elevada aderência operacional no contexto militar.

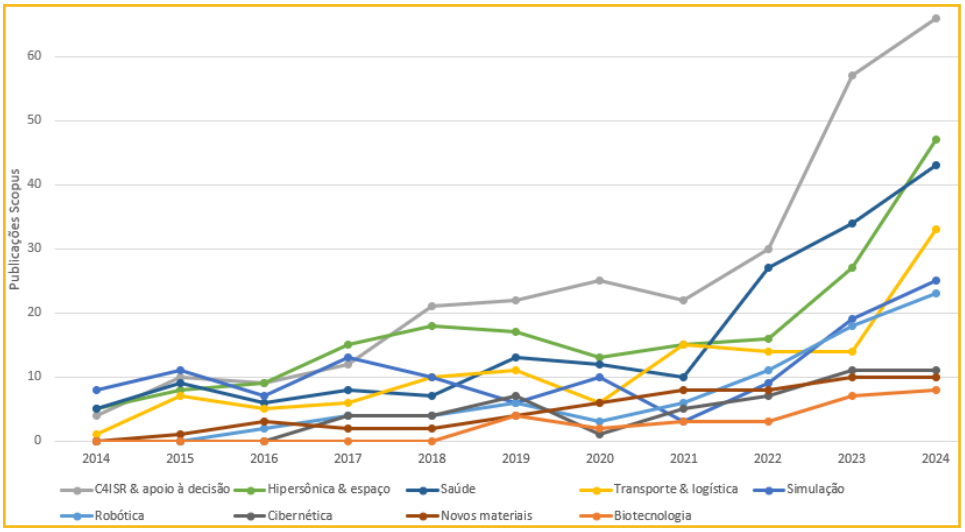
Figura 7 – Produção científica em quântica na defesa por área de pesquisa (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

Entre as áreas de aplicação de tecnologias quânticas no contexto militar, sobressaem C4ISR & apoio à decisão, seguidas de hipersônica & espaço (Figura 8). Esses resultados são compatíveis com as aplicações militares discutidas na Seção 2.1.2 e indicam concentração do interesse científico em capacidades relacionadas à superioridade informacional, apoio à decisão e sistemas aeroespaciais.

Figura 8 – Produção científica em quântica na defesa por área de aplicação (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

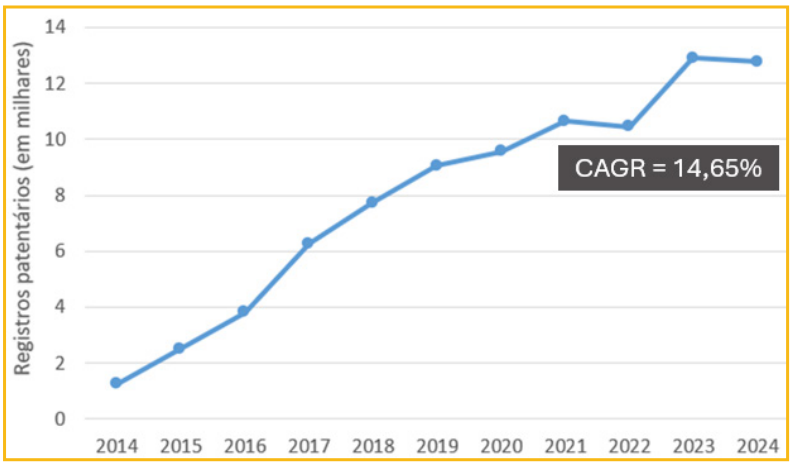
Esse diagnóstico científico serve de parâmetro para a análise da produção tecnológica apresentada a seguir, que verifica se o padrão observado se reproduz no depósito de patentes.

4.2. Produção tecnológica

4.2.1. Análise global

Os depósitos de patentes associados a tecnologias quânticas também cresceram entre 2014 e 2023 (Figura 9), com taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 14,65%. A queda em 2024 reflete a defasagem da base PATENTSCOPE, que ainda não havia incorporado todos os depósitos de 2024 até o período da coleta dos dados. A atualização completa dos registros de patentes do ano anterior na plataforma pode variar, dependendo de diversos fatores, como o tempo necessário para a publicação nacional e a integração dos dados de diferentes escritórios de patentes (WIPO, 2025). Dessa forma, o cálculo das CAGR de produção tecnológica considera apenas os dados até 2023.

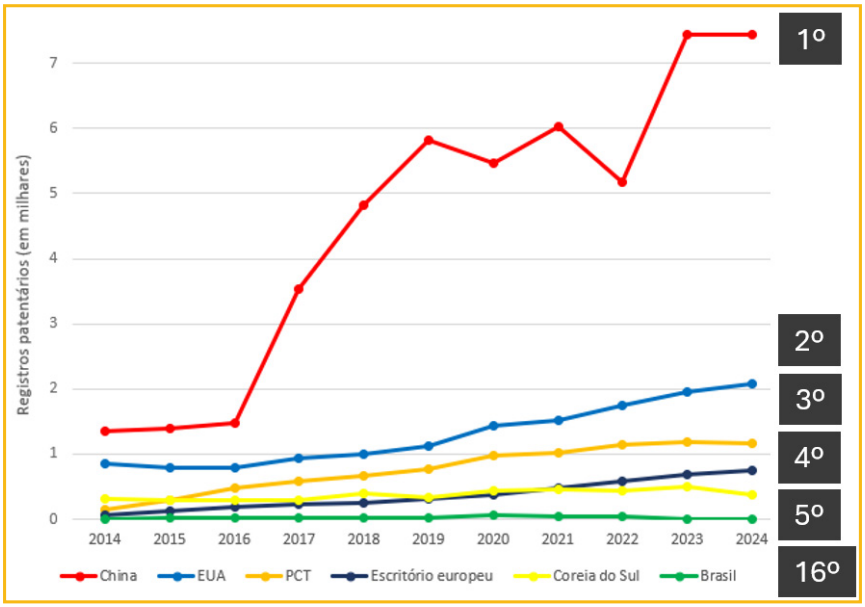
Figura 9 – Produção tecnológica em quântica (2014–2024)



Fonte: PATENTSCOPE (2026)

A China ocupa posição dominante nos depósitos de patentes relacionadas às tecnologias quânticas, seguida pelos Estados Unidos, pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI), que concentra os pedidos internacionais depositados por meio do Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes (PCT), pelo Escritório Europeu de Patentes e pela Coreia do Sul. O Brasil encontra-se na 16ª posição (Figura 10) (WIPO, 2025).

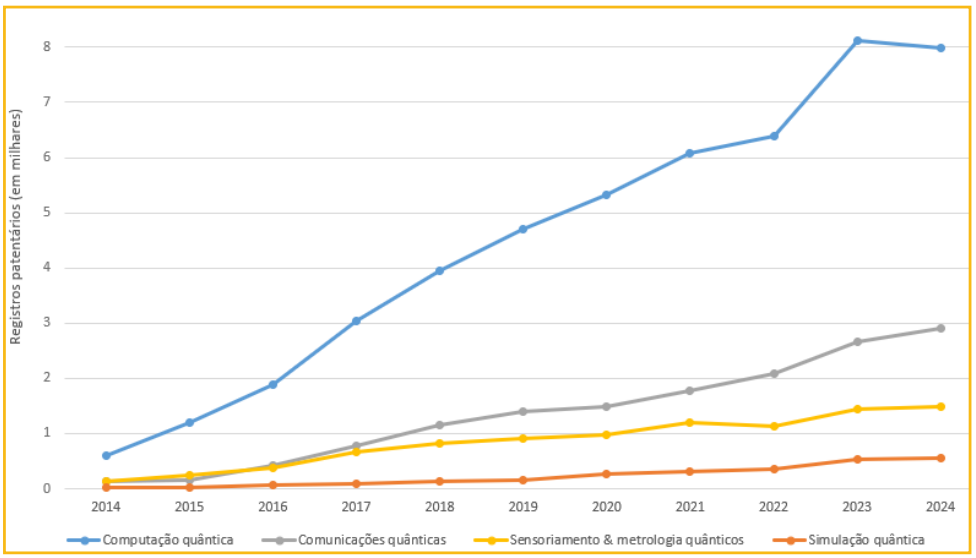
Figura 10 – Produção tecnológica por jurisdição (2014–2024)



Fonte: PATENTSCOPE (2026)

Em termos de áreas de pesquisa, destaca-se a computação quântica, de forma análoga ao cenário de análise de produção científica (Figura 11).

Figura 11 – Produção tecnológica por área de pesquisa (2014–2024)



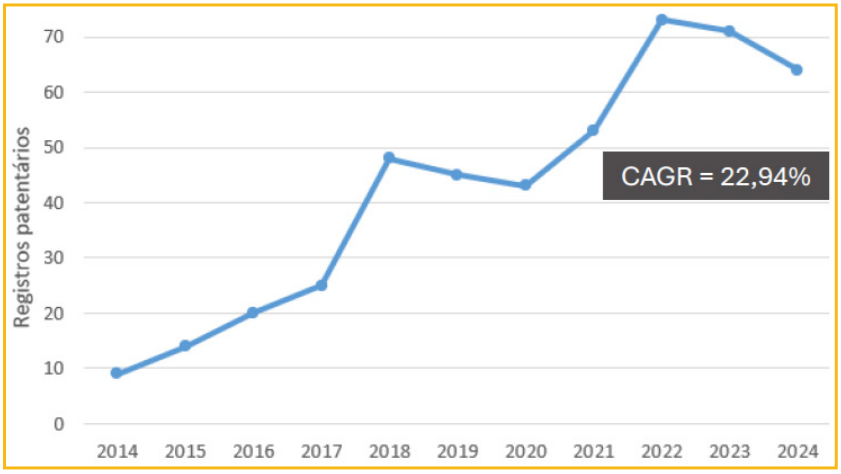
Fonte: PATENTSCOPE (2026)

Em síntese, o panorama tecnológico reproduz a concentração observada na produção científica: China e EUA centralizam cerca de 70% dos depósitos mundiais, com o Brasil em posição marginal (16ª no ranking), com apenas 253 depósitos (0,28% do total).

4.2.2. Análise focada na defesa

No campo da defesa, a produção tecnológica neste campo apresenta curva ascendente até 2022 (Figura 12), com taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 22,94%. A queda em 2024, como explicado na Seção 4.2.1, é atribuída à defasagem de atualização da base PATENTSCOPE.

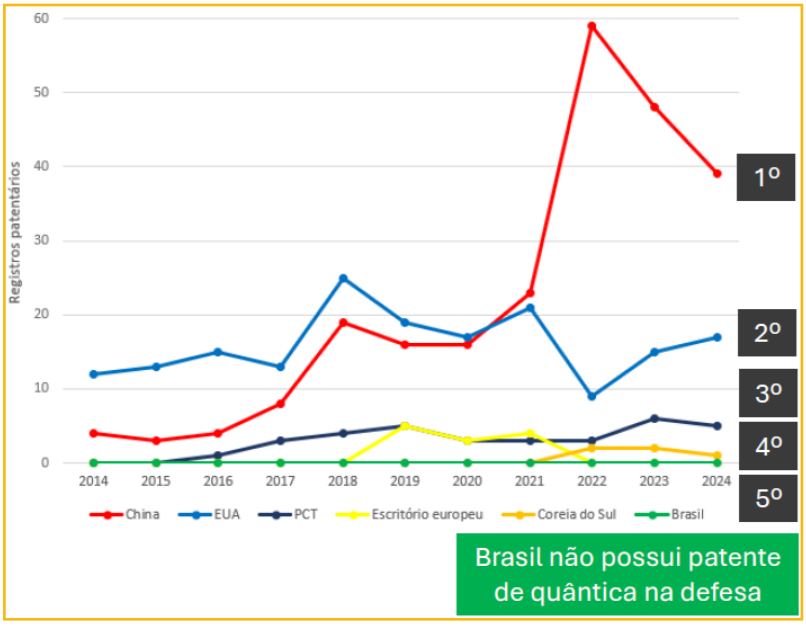
Figura 12 – Produção tecnológica em quântica na defesa (2014–2024)



Fonte: PATENTSCOPE (2026)

Na defesa, a distribuição dos depósitos de patentes acompanha o padrão global, com amplo destaque da China, seguida por EUA e escritórios regionais. O Brasil, contudo, não apresentou nenhum depósito de patente de tecnologias quânticas associada à defesa no período considerado (Figura 13).

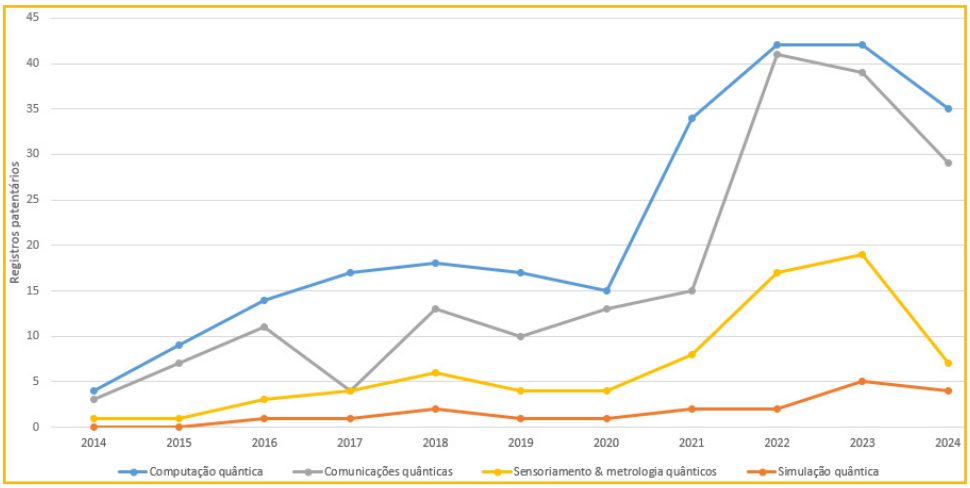
Figura 13 – Produção tecnológica em quântica na defesa por jurisdição (2014–2024)



Fonte: PATENTSCOPE (2026)

As áreas tecnológicas com maior volume de registros são computação quântica e comunicações quânticas, alinhando-se ao diagnóstico científico e ao cenário tecnológico global (Figura 14). Esse padrão temático é coerente com o referencial teórico apresentado na Seção 2.1.2, estando em sintonia com o observado na produçãocientífica (Seção 4.1.2).

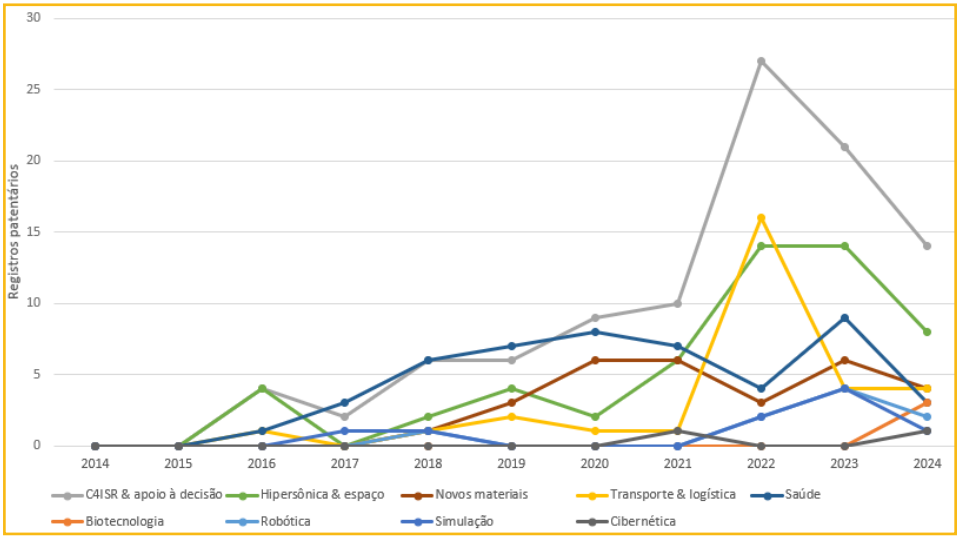
Figura 14 – Produção tecnológica em quântica na defesa por área de pesquisa (2014–2024)



Fonte: PATENTSCOPE (2026)

C4ISR & apoio à decisão e hipersônica & espaço se destacam como principais áreas de aplicação tecnológica da quântica na defesa (Figura 15).

Figura 15 – Produção tecnológica em quântica na defesa por área de aplicação (2014–2024)



Fonte: PATENTSCOPE (2026)

O diagnóstico conjugado das produções científica e tecnológica, convergente quanto às áreas de pesquisa e de aplicação, fornece a base empírica para a prospecção tecnológica de soluções de quântica para o Exército Brasileiro, apresentada a seguir.

4.3. Prospecção tecnológica de soluções de quântica para o Exército Brasileiro

O diagnóstico apresentado nas seções 4.1 e 4.2 evidenciou que as quatro vertentes das tecnologias quânticas (computação, simulação, comunicações e sensoriamento & metrologia) concentram aplicações de interesse militar, com destaque para C4ISR & apoio à decisão e hipersônica & espaço. A partir dessa base empírica, esta seção prospecta caminhos concretos de incorporação dessas tecnologias ao Exército Brasileiro, articulando as demandas operacionais evidenciadas em conflitos contemporâneos às iniciativas em curso no âmbito do EB e do IME. Ressalta-se que, em grande parte dessas aplicações, ainda não há evidências públicas robustas de emprego operacional de tecnologias quânticas em combate. Os conflitos recentes são mobilizados, portanto, como indicadores das necessidades operacionais para as quais essas tecnologias podem oferecer soluções futuras.

4.3.1. Computação quântica

Os conflitos contemporâneos evidenciaram a crescente dependência das operações militares do processamento de grandes volumes de dados provenientes de satélites, aeronaves remotamente pilotadas, radares, sensores terrestres e sistemas de inteligência. A guerra na Ucrânia e o confronto entre Índia e Paquistão em 2025 demonstraram a centralidade dos sistemas não tripulados, da inteligência de múltiplas fontes e da coordenação de sistemas de ataque e defesa em janelas temporais cada vez menores, impondo demandas computacionais que tensionam a capacidade de processamento clássico disponível. Essas demandas são compatíveis com as aplicações militares atribuídas à computação quântica na literatura especializada, particularmente em problemas de otimização logística, processamento de dados de ISTAR, identificação

de padrões, aprendizado de máquina e apoio à decisão (KRELINA, 2021; CHOI, 2023; KRELINA, 2025). Trata-se de uma vertente com caráter simultaneamente habilitador e disruptivo para a cibernética militar, conforme abordado na Seção 2.1.2.

Para o Exército Brasileiro, essa trajetória recomenda, no curto prazo, o desenvolvimento de competências antes da aquisição de capacidades computacionais quânticas próprias em larga escala. As aplicações de maior aderência à Força incluem a otimização de problemas de logística e mobilização, o planejamento de rotas e a alocação de recursos, o processamento de grandes conjuntos de dados de C4ISR e a combinação de inteligência artificial e algoritmos quânticos para apoio à decisão. Em paralelo, o desenvolvimento de competências em criptografia pós-quântica torna-se indispensável para mitigar o risco associado à estratégia *harvest now, decrypt later* (KRELINA, 2025). Nesse sentido, a aproximação do Exército com o Centro Internacional de Computação e Tecnologias Quânticas da Paraíba (CIQuanta-PB), formalizada em março de 2026 entre o Governo da Paraíba e o Departamento de Ciência e Tecnologia do Exército, e a atuação do IME na formação de pessoal e no desenvolvimento de algoritmos, comunicação, criptografia, sensores e metrologia quânticos configuram os principais vetores de internalização dessas competências no Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação do Exército (SCTIEx) (COSTA; AZEVEDO; ARAÚJO-MOREIRA, 2025).

4.3.2. Simulação quântica

Os conflitos contemporâneos têm elevado a demanda por materiais mais resistentes e leves, melhores sistemas de armazenamento energético, sensores aprimorados, novos materiais para eletrônica e fotônica, propelentes mais eficientes e soluções capazes de ampliar o alcance e a autonomia de mísseis, veículos, sistemas não tripulados e plataformas espaciais. Não existem, até o momento, evidências públicas de que simuladores quânticos tenham sido empregados diretamente na condução de conflitos como os da Ucrânia ou do Oriente Médio. Entretanto, essas

guerras demonstram a importância estratégica da capacidade de acelerar ciclos de desenvolvimento de materiais, componentes e sistemas militares, precisamente um dos campos nos quais a simulação quântica poderá produzir vantagens significativas.

Essa perspectiva é consistente com a literatura especializada, que identifica a simulação de sistemas quânticos e de estruturas moleculares como uma das aplicações mais promissoras da computação quântica, ainda que sua exploração em problemas de escala industrial permaneça condicionada à maturidade do hardware e a avanços em correção de erros (SCHLEICH et al., 2016; KRELINA, 2025). No campo da defesa, o potencial estratégico dessa vertente está associado à redução dos ciclos de desenvolvimento de materiais, componentes e sistemas militares, como tratado na Seção 2.1.2.

Para o Exército Brasileiro, a principal oportunidade prospectiva encontra-se na utilização de simuladores e computadores quânticos para a modelagem de sistemas físicos e químicos cujo tratamento em computadores clássicos seja excessivamente complexo. Entre as aplicações potenciais estão a descoberta e otimização de materiais avançados; a modelagem de moléculas e reações químicas; o desenvolvimento de materiais energéticos, baterias e sistemas de armazenamento de energia; estudos de novos materiais supercondutores e materiais para sensores; e a otimização de combustíveis e propelentes para aplicações aeroespaciais e hipersônicas. Essa trajetória apresenta particular interesse por seu potencial de fortalecer competências nacionais em materiais avançados, DQBRN (Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear), energia, hipersônica & espaço e sistemas de sensores.

Nesse campo, a infraestrutura do CIQuanta-PB também representa oportunidade para acesso experimental a computadores quânticos e para a capacitação de pesquisadores do Exército em algoritmos de simulação. No IME, essa oportunidade pode ser articulada às competências já existentes em física, química, engenharia nuclear, materiais e computação, aproximando pesquisas fundamentais de necessidades concretas da Força. O mapeamento realizado por Costa, Azevedo e

Araújo-Moreira (2025) demonstra justamente que a capacidade nacional em tecnologias quânticas está predominantemente concentrada em instituições científicas e que o grupo vinculado ao IME apresenta perfil singularmente transversal, podendo funcionar como mecanismo de conexão entre a infraestrutura computacional emergente no país e as demandas tecnológicas do SCTIEx.

4.3.3. Comunicações quânticas

As comunicações constituem uma das áreas nas quais as necessidades evidenciadas pelos conflitos contemporâneos apresentam maior correspondência com as capacidades oferecidas pelas tecnologias quânticas. A guerra na Ucrânia vem demonstrando o papel decisivo da guerra eletrônica, da interferência de sinais, da proteção das redes de comando e controle e da segurança dos enlaces utilizados por sistemas não tripulados. Da mesma forma, o confronto Índia-Paquistão de 2025 destacou a importância da integração entre sensores, sistemas de defesa aérea, aeronaves, mísseis e estruturas de comando e controle em um ambiente sujeito à guerra eletrônica e à disputa pela superioridade informacional. Essas experiências reforçam a necessidade de comunicações militares mais resilientes à interceptação e à intrusão.

Essa necessidade encontra respaldo na literatura especializada. A Distribuição Quântica de Chaves (QKD) possibilita comunicações cuja segurança decorre das leis da mecânica quântica, conforme apontado na Seção 2.1.2. Embora ainda não seja uma tecnologia disseminada no nível tático, redes quânticas já estão em implantação e experimentação em diferentes países, com elevado potencial para a proteção de enlaces estratégicos (KRELINA, 2021; KRELINA, 2025). Ademais, a preparação para a era quântica requer a incorporação progressiva da criptografia pós-quântica aos sistemas militares, visto que as duas abordagens são complementares: enquanto a primeira utiliza propriedades físicas quânticas para a distribuição segura de chaves, a segunda busca proteger sistemas criptográficos convencionais contra ataques executados por computadores quânticos (KRELINA, 2025).

A importância estratégica dessa vertente é corroborada pelo diagnóstico científico e tecnológico apresentado neste estudo, no qual as comunicações quânticas figuram entre as áreas de pesquisa com maior presença tanto na literatura especializada quanto nos depósitos de patentes associados à defesa.

Para o Exército Brasileiro, a QKD apresenta potencial especialmente elevado para a proteção de enlaces fixos e de infraestrutura crítica, redes de comando e controle e comunicações entre instalações estratégicas. Em etapas posteriores de maturação, enlaces ópticos em espaço livre e sistemas QKD satelitais poderão ampliar esse emprego para plataformas móveis e regiões remotas. Uma trajetória prospectiva relevante seria iniciar pela proteção de enlaces de alto valor estratégico da rede corporativa do Exército (EBNet) e do Comando de Defesa Cibernética (ComDCiber), evoluindo posteriormente para sua integração ao SISFRON (Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras) e a redes militares implantadas na Amazônia. O EB já apresenta iniciativas concretas nessa direção. A Rede Hermes Quântica, coordenada pelo IME, desenvolve uma infraestrutura de QKD voltada a comunicações críticas e aplicações de Defesa, tendo implementado o protocolo BB84 e realizado o ciclo completo de geração, transmissão, detecção e validação de chaves quânticas. O sistema alcança até 120 km em fibra óptica, com testes laboratoriais já realizados e planejamento de enlaces reais entre o IME, o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e a PUC-Rio (BRASIL, 2026a). A iniciativa se articula à Rede Rio Quântica e oferece base tecnológica para expansões futuras, inclusive para a Amazônia (IME, 2025).

4.3.4. Sensoriamento & metrologia quânticos

O sensoriamento e a metrologia constituem provavelmente a vertente das tecnologias quânticas com maior perspectiva de emprego militar em horizonte temporal próximo. Os conflitos contemporâneos demonstram a crescente vulnerabilidade de sistemas militares dependentes de sinais externos de posicionamento, navegação e tempo. Na Ucrânia, interferências e *spoofing* de sinais GNSS (*Global Navigation*

Satellite System) têm afetado sistemas militares e civis, evidenciando a necessidade de alternativas capazes de operar em ambientes nos quais o GPS (*Global Positioning System*) esteja degradado ou indisponível. Além disso, os conflitos no Oriente Médio vêm reiterando a importância da identificação de estruturas subterrâneas, enquanto a crescente relevância de plataformas furtivas e submarinas amplia a demanda por sensores capazes de identificar pequenas variações de campos magnéticos e gravitacionais.

Essas demandas encontram respaldo na literatura especializada. Sensores quânticos baseados em interferometria atômica, magnetometria, gravimetria e relógios atômicos avançados vêm sendo testados para navegação independente de GNSS, detecção subterrânea e submarina e geração de referências de tempo de altíssima precisão (KRELINA, 2021; KRELINA, 2025).

Para a realidade brasileira, essa vertente assume relevância estratégica específica: sensores e sistemas de navegação quânticos capazes de operar independentemente de sinais GNSS e radares quânticos baseados em superposição podem contribuir significativamente para a detecção de aeronaves furtivas em regiões de difícil acesso (CHEN et al., 2013; LIAO et al., 2018), bem como para a vigilância e dissuasão na Amazônia – papel central do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM) – e para o aprimoramento da consciência marítima na Amazônia Azul, em sua Zona Econômica Exclusiva (ZEE) (ANDRADE et al., 2019; COSTA; AZEVEDO; ARAÚJO-MOREIRA, 2025).

No âmbito do Exército Brasileiro, essas capacidades podem ser particularmente relevantes para o SISFRON, para operações na Amazônia e para sistemas de artilharia, defesa antiaérea, guerra eletrônica e aeronaves remotamente pilotadas. Sensores quânticos poderiam reduzir a dependência de GNSS em ambientes contestados; magnetômetros e gravímetros de alta sensibilidade, ampliar a identificação de estruturas e alterações no terreno; relógios atômicos, aumentar a resiliência de posicionamento, navegação e sincronização; e sensores químicos, biológicos, radiológicos e nucleares, proporcionar maior sensibilidade e seletividade. Costa,

Azevedo e Araújo-Moreira (2025) identificam sensores e metrologia quânticos como uma das quatro áreas nacionais com potencial de transbordamento para a Defesa, incluindo aplicações em navegação autônoma e sensoriamento avançado.

O IME apresenta iniciativas diretamente relacionadas a essa trajetória. O Projeto de Desenvolvimento de Sensores Quânticos, integrado a programa financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) na área de materiais avançados e dispositivos multifuncionais para DQBRN, busca explorar fenômenos e materiais de interesse quântico para obtenção de sensores e detectores de aplicação dual. No mesmo ecossistema, o SENSEWAR, biossensor eletroquímico portátil destinado à detecção de neurotoxinas organofosforadas, incluindo agentes de guerra química, não deve ser classificado, em sua configuração atual, como sensor quântico em sentido estrito; sua utilização com grafeno e modelagem computacional, contudo, evidencia trajetória tecnológica complementar para a construção de competências em materiais, processamento de sinais e sensoriamento de elevada sensibilidade (BRASIL, 2026b).

A convergência entre esses projetos e as competências do grupo de pesquisa do IME em dispositivos e metrologia quântica cria condições para que a instituição avance progressivamente de sensores baseados em materiais avançados para dispositivos que explorem diretamente superposição, tunelamento, interferometria ou outros fenômenos característicos da segunda revolução quântica. Essa trajetória alinha-se ao horizonte de planejamento do Exército Brasileiro expresso no Conceito Operacional do Exército Brasileiro (COEB), em sua 2ª edição (2026), que projeta a incorporação de tecnologias emergentes e disruptivas, entre elas as quânticas, à estrutura de força e às capacidades operacionais da Força no longo prazo (BRASIL, 2026c).

Em síntese, a prospecção indica que as quatro vertentes analisadas apresentam horizontes distintos de incorporação ao Exército Brasileiro. As comunicações quânticas e o sensoriamento & metrologia apresentam oportunidades mais próximas de experimentação em ambientes relevantes, enquanto a computação e a simulação quânticas demandam, inicialmente, investimento em formação de recursos humanos,

acesso a infraestrutura e desenvolvimento de algoritmos e casos de uso. A existência de iniciativas já em curso no âmbito do EB, como as descritas nesta seção, demonstra que essa trajetória se encontra em estágio inicial de institucionalização. O desafio central passa a ser integrar esses esforços em um roteiro tecnológico comum, que estabeleça problemas operacionais prioritários, níveis de maturidade desejados, demonstradores tecnológicos e mecanismos de transição das pesquisas desenvolvidas no IME e em instituições parceiras para capacidades efetivamente incorporadas à Força.

5 DISCUSSÃO

5.1. Diagnóstico sintético dos resultados

As Tabelas 1 a 4 sintetizam os resultados das análises de produção científica e tecnológica em quântica (Seções 4.1 e 4.2), nos contextos global e de defesa, conduzidas segundo a metodologia da Seção 3, enquanto as Figuras 16 e 17 projetam a evolução desses indicadores até 2029. Com base nesse panorama, esta seção discute o significado desses resultados e suas implicações para o Exército Brasileiro.

A concentração de quase 50% da produção científica mundial e de cerca de 60% da produção científica em defesa em China e Estados Unidos, conforme evidenciado nos quadros 1 e 2, não resulta apenas da dinâmica espontânea da pesquisa acadêmica, mas reflete políticas nacionais que tratam as tecnologias quânticas como capacidades estratégicas de duplo uso (KANIA, 2020; GIRARDI; GALDINO, 2024). Esse padrão sugere que a liderança no domínio quântico é construída por meio de investimentos coordenados em pesquisa, formação de recursos humanos, infraestrutura científica e proteção de tecnologias críticas, e não exclusivamente por capacidade acadêmica instalada. A mesma lógica ajuda a explicar o desempenho da Índia, cujas elevadas taxas de crescimento, tanto no contexto global quanto na defesa, indicam uma inserção cada vez mais estruturada na corrida tecnológica quântica. As projeções apresentadas nas Figuras 16 e 17 sugerem que esse movimento pode

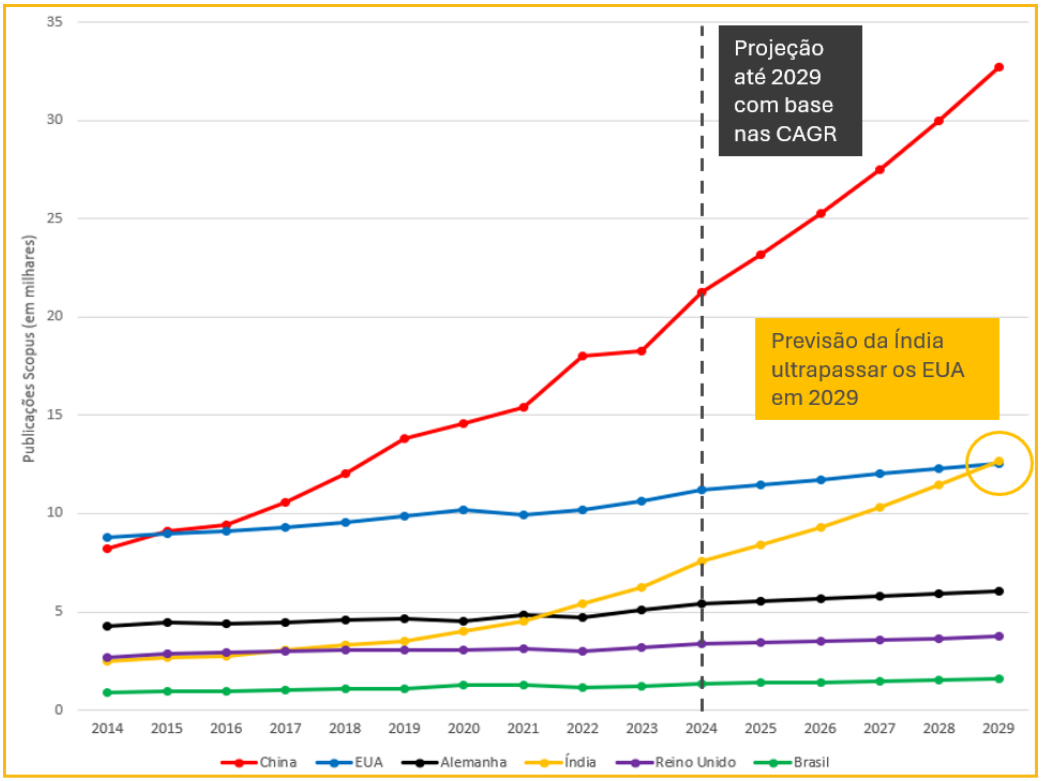
alterar significativamente a distribuição internacional de capacidades ao longo da próxima década. Para países periféricos, o caso indiano demonstra que políticas públicas consistentes podem favorecer trajetórias de ascensão tecnológica mesmo fora do grupo tradicional de líderes.

Quadro 1 – Resumo da análise de produção científica em quântica (2014–2024)

Países	Quantidade Absoluta	Quantidade Relativa (%)	Produção Acumulada (%)	CAGR (%)
China	150.648	27,00%	27,00%	9,02%
EUA	107.804	19,32%	46,31%	2,23%
Alemanha	51.389	9,21%	55,52%	2,20%
Índia	45.582	8,17%	63,69%	10,80%
Reino Unido	33.340	5,97%	69,66%	2,04%
Brasil [17º]	12.275	2,20%	71,86%	3,39%
TOTAL	558.056			

Fonte: Scopus (2026)

Figura 16 – Projeção da produção científica em quântica (2024–2029)



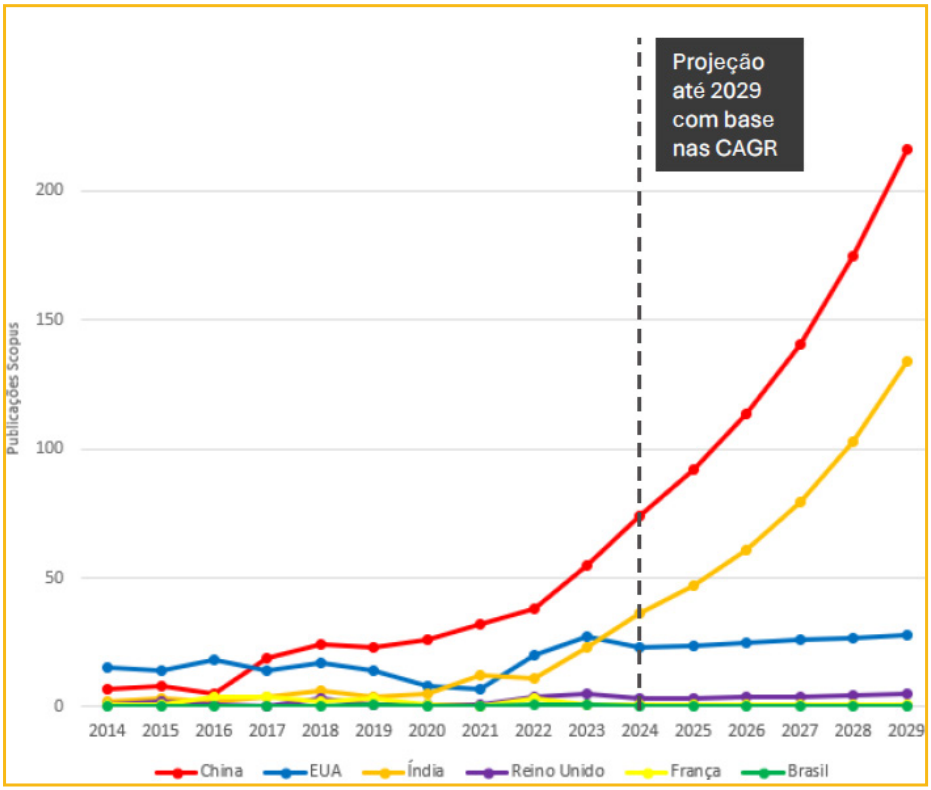
Fonte: Scopus (2026)

Quadro 2 – Resumo da análise de produção científica em quântica na defesa (2014–2024)

Países	Quantidade Absoluta	Quantidade Relativa (%)	Produção Acumulada (%)	CAGR (%)
China	311	37,02%	37,02%	23,91%
EUA	177	21,07%	58,10%	3,96%
Índia	108	12,86%	70,95%	30,05%
Reino Unido	22	2,62%	73,57%	10,50%
França	21	2,50%	76,07%	0,00%
Brasil [35º]	3	0,36%	76,43%	0,00%
TOTAL	840			

Fonte: Scopus (2026)

Figura 17 – Projeção da produção científica em quântica na defesa (2024–2029)



Fonte: Scopus (2026)

A posição brasileira é periférica nos rankings internacionais, ocupando o 17º lugar na produção científica global, o 35º no recorte de defesa, o 16º nos depósitos de patentes e sem registros de patentes de defesa (quadros 3 a 4).

Quadro 3 – Resumo da análise de produção tecnológica em quântica (2014–2024)

Países	Quantidade Absoluta	Quantidade Relativa (%)	Produção Acumulada (%)	CAGR (%)
China	49.960	55,42%	55,42%	18,53%
EUA	14.277	15,84%	71,26%	8,60%
Coreia do Sul	4.120	4,57%	75,83%	5,05%
Brasil [16º]	253	0,28%	76,11%	3,63%
TOTAL	90.146			

Fonte: PATENTSCOPE (2026)

Tabela 4 – Resumo da análise de produção tecnológica em quântica na defesa (2014–2024)

Países	Quantidade Absoluta	Quantidade Relativa (%)	Produção Acumulada (%)	CAGR (%)
China	239	51,40%	51,40%	28,21%
EUA	176	37,85%	89,25%	2,26%
Coreia do Sul	5	1,08%	90,32%	Não se aplica
Brasil	0	0,00%	90,32%	Não se aplica
TOTAL	465			

Fonte: PATENTSCOPE (2026)

O contraste entre a produção científica existente (quadros 1 e 2) e a reduzida geração de propriedade intelectual (quadros 3 e 4) sugere um descompasso entre a produção de conhecimento e sua transformação em capacidades tecnológicas. Em um ambiente caracterizado pela crescente competição internacional por tecnologias críticas, essa lacuna tende a ampliar riscos de dependência tecnológica e vulnerabilidade estratégica (KRELINA, 2025). Nesse contexto, a articulação entre pesquisa, infraestrutura tecnológica e demandas operacionais torna-se elemento fundamental para converter capacidades científicas em aplicações efetivas para a defesa. Essa lacuna é precisamente o problema que a prospecção tecnológica apresentada na Seção 4.3 busca endereçar, ao articular competências acadêmicas, infraestrutura científica e demandas operacionais do Exército Brasileiro.

A predominância das áreas de computação quântica e comunicações quânticas, observada tanto na produção científica quanto tecnológica, sugere que essas vertentes concentram atualmente a maior mobilização internacional de recursos humanos, investimentos e esforços de inovação. Tal predominância é coerente com seu potencial de aplicação em processamento de informação, criptografia, logística, inteligência e apoio à decisão, capacidades diretamente relacionadas às necessidades operacionais contemporâneas, conforme discutido no referencial teórico (Seção 2.1.2) (KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023; KRELINA, 2025).

De forma complementar, o destaque das áreas de aplicação relacionadas a C4ISR & apoio à decisão e hipersônica & espaço indica que os países líderes concentram esforços em capacidades associadas à superioridade informacional, integração de sensores, processamento de dados e projeção de poder. Esses padrões oferecem parâmetros relevantes para processos de benchmarking e para a definição de prioridades nacionais em pesquisa e desenvolvimento.

Os resultados sugerem que o Exército Brasileiro se encontra em uma etapa inicial de construção de capacidades relacionadas às tecnologias quânticas de segunda geração. Embora a participação brasileira permaneça modesta em comparação com os principais atores internacionais, iniciativas já existentes no âmbito do Exército Brasileiro, do Instituto Militar de Engenharia (IME), do Comando de Defesa Cibernética (ComDCiber) e do CIQuanta-PB indicam o surgimento de uma base institucional capaz de sustentar o desenvolvimento futuro dessas competências. Por fim, os resultados reforçam que as vertentes apresentam horizontes distintos de incorporação e que o desafio central reside na coordenação de projetos, competências e parcerias em torno de um roteiro tecnológico comum, conforme sintetizado na Seção 4.3.

5.2. Participação relativa da defesa

Como apresentado na Quadro 5, no Brasil apenas 0,15% das publicações científicas sobre quântica tratam explicitamente do setor de defesa, e somente 0,52%

das patentes de tecnologias quânticas são vinculadas a aplicações militares. Apesar da ainda baixa representatividade em relação às demais áreas de aplicação, destaca-se que a produção na defesa apresenta tendência de crescimento superior à do contexto global. Na vertente científica, o CAGR de defesa é 17,45% contra o CAGR global de 4,59%. Na produção tecnológica (patentes), a defesa tem CAGR de 22,94% contra CAGR global de 14,65%.

Quadro 5 – Comparativo da defesa em relação ao contexto global

PRODUÇÃO CIENTÍFICA				**PRODUÇÃO TECNOLÓGICA**			
Contexto	**CAGR (%)**	**Quantidade Absoluta**	**Quantidade Relativa (%)**	**Contexto**	**CAGR (%)**	**Quantidade Absoluta**	**Quantidade Relativa (%)**
Defesa	17,45%	840	0,15%	**Defesa**	22,94%	465	0,52%
Global	4,59%	558.056	100%	**Global**	14,65%	90.146	100%

Fonte: Scopus (2026); PATENTSCOPE (2026)

Esse comparativo quantitativo, entretanto, não pode ser dissociado da análise qualitativa sobre os mecanismos de geração de conhecimento na defesa, historicamente mais restritivos e fragmentados. Nesse contexto, o fortalecimento das conexões entre organizações militares e instituições civis surge como estratégia relevante para acelerar a produção científica e tecnológica. Destaca-se o conceito de inovação às avessas (*reverse innovation*), no qual fluxos de conhecimento e soluções tecnológicas emergem de setores civis ou periféricos para atender demandas originalmente militares ou governamentais (GOVINDARAJAN; TRIMBLE, 2012). Tal abordagem tem ganhado força especialmente em contextos com menor orçamento de P&D militar, como no caso brasileiro, onde a cooperação com ICTs civis pode não apenas ampliar a base tecnológica disponível para defesa, mas também favorecer a difusão dual de tecnologias. Complementarmente, modelos de inovação aberta (CHESBROUGH, 2003) e da hélice tríplice (ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 1995) constituem referenciais importantes para o fortalecimento das capacidades científicas e tecnológicas associadas à defesa.

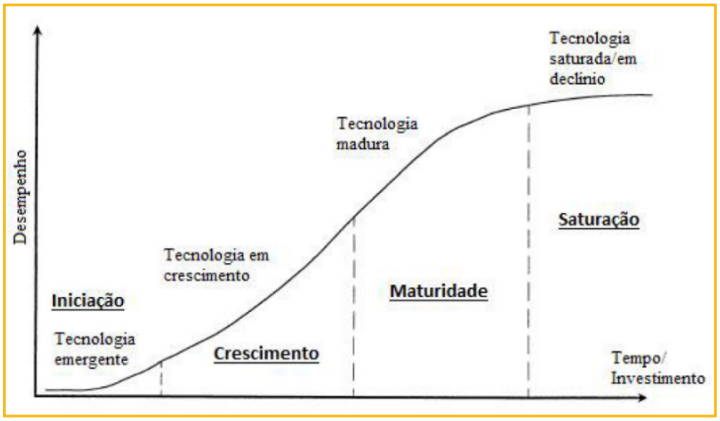
5.3. Modelo de desenvolvimento de tecnologias quânticas

Em termos globais, a análise das curvas de produção científica (Figuras 2 e 5) e tecnológica (Figuras 9 e 12) sugere um padrão de desenvolvimento compatível com o modelo linear de inovação, no qual a pesquisa científica precede a geração de aplicações tecnológicas (GODIN, 2006). Em 2014, já existia um volume expressivo de publicações científicas relacionadas à quântica (Figura 2), enquanto a produção tecnológica ainda se encontrava em estágio embrionário (Figura 9). Esse cenário começa a se modificar a partir de 2016, quando os depósitos de patentes passam a crescer de forma mais acentuada nos contextos global e de defesa. Os resultados indicam, portanto, que as curvas de publicações científicas antecedem as curvas de produção tecnológica, reforçando a relevância da pesquisa básica para a geração de capacidades tecnológicas em um domínio estratégico como o das tecnologias quânticas. A sinergia entre ciência e tecnologia permanece, assim, um elemento estruturante para países que buscam avançar no desenvolvimento e na incorporação dessas tecnologias.

5.4. Ciclo de vida das áreas de pesquisa (curvas-S)

O ciclo de vida de uma determinada área tecnológica pode ser representado por uma curva em S que indica sua tendência de desenvolvimento, a qual é dividida em quatro fases principais: iniciação, crescimento, maturidade e saturação. As curvas-S são construídas com base no número acumulado ao longo do tempo de métricas relacionadas à tecnologia em análise (DE WECK, 2022; ERNST, 1997; MADEU; PELLANDA; PASSOS, 2021, como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Curva-S do ciclo de vida de uma área tecnológica hipotética

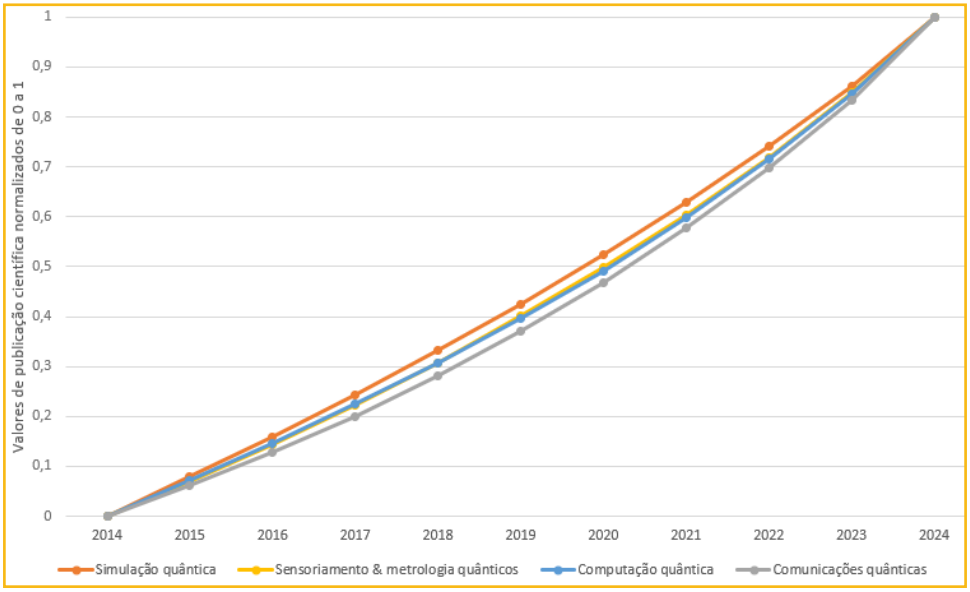


Fonte: Madeu, Pellanda e Passos (2021)

Neste estudo, as curvas-S foram construídas exclusivamente com base nos valores acumulados de produção científica das áreas de pesquisa em tecnologias quânticas. Os dados de produção tecnológica não foram considerados devido à limitação de disponibilidade dos dados de 2024 na base PATENTSCOPE, conforme detalhado na Seção 4.2.1.

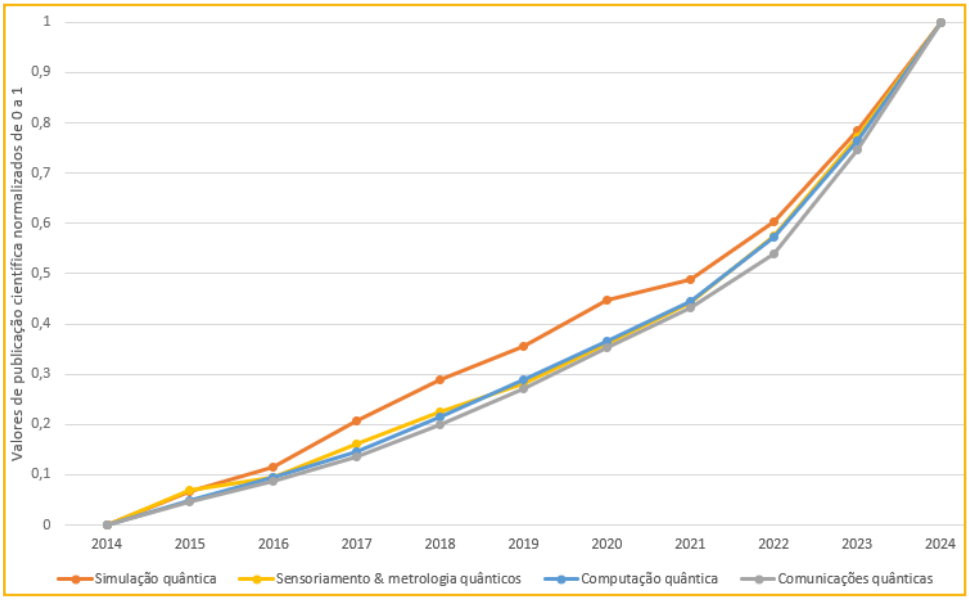
As Figuras 19 e 20 mostram as curvas-S normalizadas e sobrepostas das quatro áreas de pesquisa – computação quântica, simulação quântica, comunicações quânticas e sensoriamento & metrologia quânticos. Em ambos os cenários (global e defesa), as quatro áreas de pesquisa permanecem na fase de crescimento, indicando que as tecnologias quânticas ainda não atingiram um estágio de maturidade ou saturação. Destacam-se computação e comunicações quânticas, cujas curvas apresentam aceleração mais pronunciada nos anos recentes.

Figura 19 – Curva-S de produção científica em quântica (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

Figura 20 – Curva-S de produção científica em quântica na defesa (2014–2024)



Fonte: Scopus (2026)

5.5. Aspectos geopolíticos

Os resultados apresentados neste estudo devem ser analisados também sob uma perspectiva geopolítica. O domínio de tecnologias quânticas extrapola sua dimensão estritamente científico-tecnológica: capacidades em computação, simulação, comunicações e sensoriamento & metrologia podem produzir vantagens econômicas e militares assimétricas (Seção 2.1.2). Esse caráter estratégico ajuda a explicar por que China e EUA ocupam posições de destaque na produção científica e tecnológica identificada neste estudo (Seções 4.1 e 4.2) e, sobretudo, por que as tecnologias quânticas vêm sendo progressivamente incorporadas às políticas de segurança nacional, defesa, controle de exportações e proteção de tecnologias críticas – configurando um quadro de cerceamento tecnológico que se manifesta em distintas vertentes, examinadas a seguir.

Um primeiro aspecto relevante diz respeito à interpretação dos dados de produção tecnológica brasileira. Conforme apresentado na Tabela 3, no período analisado, foram identificados 253 depósitos de patente relacionados às tecnologias quântica

na jurisdição brasileira. Desses, apenas 7,5% possuem organizações ou pessoas de origem nacional como depositantes, enquanto 92,5% estão associados a depositantes estrangeiros, evidenciando que a grande maioria dos depósitos no país reflete estratégias de proteção tecnológica e reserva de mercado no território brasileiro, e não produção tecnológica nacional. Observa-se, ainda, forte concentração de depositantes de origem norte-americana, responsáveis por 61,7% dos registros identificados na jurisdição brasileira. Cabe notar que mesmo a parcela de depósitos nacionais é majoritariamente composta por instituições de ensino e pesquisa – como USP (Universidade de São Paulo), UFG (Universidade Federal de Goiás) e UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) –, cuja motivação se associa mais à avaliação acadêmica da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do que à proteção de soluções comerciais, reforçando o descompasso entre produção de conhecimento e conversão em capacidades tecnológicas, como discutido na Seção 5.1.

Esse cenário reflete, em boa medida, a ausência de uma estratégia nacional consolidada para tecnologias quânticas. Diferentemente das potências que articulam políticas explícitas de fomento e proteção do domínio, as iniciativas brasileiras permanecem dispersas entre instituições e projetos – IME, Rede Hermes Quântica, CIQuanta-PB e ComDCiber, mapeados na Seção 4.3 –, sem a coordenação de um roteiro tecnológico comum que transforme competências isoladas em capacidades efetivas (OLIVEIRA; AZEVEDO; ARAÚJO-MOREIRA, 2026). Essa lacuna amplia a exposição do país ao quadro de cerceamento e à competição estratégica descritos nesta seção.

Outro ponto de discussão está relacionado ao conceito de dualidade da dualidade tecnológica abordado em Girardi e Galdino (2024), no âmbito das dimensões estratégica e institucional da quântica na defesa (Seção 2.2). Os autores mostram que a dualidade pode assumir vertentes distintas conforme o posicionamento de um país no sistema internacional. Para países em desenvolvimento, a possibilidade de aplicações civis e militares pode ser utilizada como mecanismo para mobilizar recursos financeiros, apoio político e capacidades científico-tecnológicas

originalmente disponíveis fora do orçamento de defesa. Em sentido oposto, países tecnologicamente proeminentes podem utilizar justamente o potencial militar de uma tecnologia desenvolvida ou adquirida para finalidades civis como justificativa para restringir sua transferência, configurando uma forma seletiva de cerceamento tecnológico (GIRARDI; GALDINO, 2024).

As iniciativas de tecnologias quânticas de segunda geração em desenvolvimento no IME ilustram concretamente as duas vertentes dessa dinâmica. De um lado, projetos relacionados a sensores e dispositivos avançados de aplicação em DQBRN vêm sendo inseridos em iniciativas financiadas pela Finep voltadas a aplicações duais. Por outro lado, a trajetória recente do projeto de comunicações quânticas do IME tem enfrentado restrições para obtenção de componentes tecnológicos de origem estrangeira, tendo sua destinação militar constituído elemento relevante para a negativa de fornecimento. O episódio representa um caso concreto de vulnerabilidade decorrente da dependência externa em tecnologias críticas: mesmo quando a pesquisa é realizada nacionalmente e possui importantes aplicações civis potenciais, sua vinculação a capacidades militares pode acionar mecanismos de controle de exportação e impedir o acesso a componentes indispensáveis. O caso insere-se, ademais, em um quadro mais amplo de disputa por pontos de estrangulamento da cadeia de suprimentos quântica: desde 2024, os Estados Unidos e seus aliados convergiram controles sobre sistemas criogênicos, semicondutores e equipamentos científicos críticos (IISS, 2026), movimento que, segundo parte da literatura, pode ter efeito paradoxal ao acelerar a busca de autossuficiência pelos países visados (RUSI, 2025).

Esse movimento de cerceamento tecnológico intensificou-se após a invasão russa da Ucrânia. Em novembro de 2021, o *Bureau of Industry and Security* (BIS) incluiu oito entidades chinesas na *Entity List* por supostamente contribuírem para aplicações militares da computação quântica chinesa (UNITED STATES, 2021); a partir de 2022, controles sobre hardware, software e tecnologias quânticas foram estendidos à Rússia e a Belarus. A *Executive Order* 14105, de 2023, regulamentada em 2024, passou a

restringir investimentos norte-americanos em computadores quânticos, componentes críticos, plataformas de sensoriamento e redes de comunicação quântica no exterior (UNITED STATES, 2024a), e outras 22 organizações chinesas foram adicionadas à *Entity List* em 2024, reforçando a associação entre domínio tecnológico, segurança nacional e competição estratégica (UNITED STATES, 2024b).

Esse conjunto de acontecimentos oferece também uma interpretação plausível para a inflexão observada nos resultados desta pesquisa a partir de 2021: a intensificação de controles de exportação (UNITED STATES, 2021; 2024a; 2024b) e de estratégias nacionais e regionais para tecnologias quânticas (NATO, 2021; 2024) no início da década de 2020 impulsionou uma corrida científico-tecnológica mundial associada à área de quântica.

6 CONCLUSÃO

As tecnologias quânticas de segunda geração têm se consolidado como vetor central de transformação tecnológica, com aplicações estratégicas no setor de defesa. Este artigo buscou diagnosticar a produção científica e tecnológica sobre quântica, com foco na defesa, e prospectar soluções tecnológicas alinhadas ao contexto do Exército Brasileiro.

Entre 2014 e 2024, a produção científico-tecnológica neste campo apresentou crescimento expressivo, sobretudo após 2021, com liderança de China e EUA e participação modesta do Brasil. A produção científica da Índia vem crescendo de forma destacada, principalmente na vertente da defesa.

As áreas de pesquisa apresentam semelhanças entre os cenários global e militar, com destaque para computação e comunicações quânticas – também as de crescimento mais acentuado nas curvas-S. Na defesa, as áreas de aplicação que mais se destacaram foram C4ISR & apoio à decisão e hipersônica & espaço.

Em que pese o avanço global na geração de conhecimento e na produção tecnológica, os avanços no setor de defesa são incipientes – apenas 0,15% e 0,52%

do total, respectivamente –, sugerindo que o campo vem sendo impulsionado por setores civis e reforçando a importância da inovação aberta (CHESBROUGH, 2003) e da hélice tríplice (ETZKOWITZ; LEYDESDORFF, 1995) na defesa. Destacam-se, ainda, os investimentos em P&D, pois as tecnologias quânticas tem seguido o modelo de inovação linear, em que o conhecimento científico alimenta a geração de inovações tecnológicas (GODIN, 2006).

Não obstante a baixa representatividade do setor militar, sua produção científico-tecnológica cresce acima da global: CAGR de 17,45% contra 4,59% na vertente científica e 22,94% contra 14,65% na tecnológica.

A despeito do prognóstico negativo quanto à contribuição nacional no cenário global, o Brasil dispõe de base crescente de produção e ambiente institucional promissor, especialmente no âmbito do Exército Brasileiro. A prospecção, baseada em experiências internacionais recentes e iniciativas internas, indicou possibilidades concretas de adoção da quântica em aplicações militares nacionais, com destaque para a participação do IME.

Como contribuição principal, o artigo oferece síntese empírica atualizada da evolução da quântica aplicada à defesa e propõe caminhos viáveis para sua incorporação em iniciativas do Exército Brasileiro. As limitações decorrem, sobretudo, da defasagem temporal da base PATENTSCOPE e da ausência de análise qualitativa dos documentos. Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar essas análises, mapear os atores nacionais da hélice tríplice de defesa e propor um roteiro tecnológico que oriente decisões estratégicas em P&D de quântica.

Por fim, o desenvolvimento de capacidade nacional em tecnologias quânticas assume caráter estratégico para reduzir vulnerabilidades externas, preservar a autonomia decisória e mitigar riscos de cerceamento tecnológico e de concentração internacional de conhecimento. O crescente enquadramento das tecnologias quânticas como questão de segurança, sua elevada dualidade e o acirramento da competição entre grandes potências indicam que a dependência de fornecedores

estrangeiros pode comprometer tanto a continuidade de projetos de P&D quanto a futura incorporação dessas tecnologias às capacidades militares nacionais. Ampliar competências científicas, tecnológicas e industriais autóctones, articulando Estado, ICTs e setor produtivo, é essencial para transformar o potencial brasileiro em capacidades soberanas e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ACM. ACM **Computing Classification System**. 2012. Disponível em: https://dl.acm.org/ccs. Acesso em: 19 nov. 2025.

ANDRADE, I. O.; ROCHA, A. J. R.; FRANCO, L. G. A. Sistema de gerenciamento da Amazônia Azul: soberania, vigilância e defesa das águas jurisdicionais brasileiras. Brasília: IPEA, 2019. (Texto para Discussão, 2452).

ARAÚJO-MOREIRA, F. M.; CARNEIRO, V. G. A.; GALDINO, J. F. Tecnologias quânticas: uma questão de soberania nacional. **Revista da Escola de Guerra Naval**, v. 30, n. 3, p. 643–686, 2024. DOI: 10.21544/2359-3075.30330.

AZEVEDO, C. E. F.; COSTA, G. A. B.; ARAÚJO, L. E. Desafios para a política de inovação no setor de defesa brasileiro: óbices e barreiras culturais e estruturais. **Revista da Escola de Guerra Naval**, v. 27, n. 1, p. 121–160, 2021. DOI: 10.21544/1809-3791.v27n1.p121-160.

BENNETT, C. H.; BRASSARD, G. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, **Systems and Signal Processing. Bangalore**: IEEE, 1984. p. 175–179.

BENNETT, C. H.; BRASSARD, G.; CRÉPEAU, C.; JOZSA, R.; PERES, A.; WOOTTERS, W. K. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. **Physical Review Letters**, v. 70, n. 13, p. 1895–1899, 1993. DOI: 10.1103/PhysRevLett.70.1895.

BRASIL. **Rede Hermes Quântica**. Vitrine Tecnológica do IME, 2026a. Disponível em: https://vitrinetecnologica.ime.eb.br/?p=1411. Acesso em: 22 ago. 2026.

BRASIL. **Sense War – Biossensor para Detecção Rápida de Neurotoxinas Organofosforadas**. Vitrine Tecnológica do IME, 2026b. Disponível em: https://vitrinetecnologica.ime.eb.br/?p=458. Acesso em: 22 ago. 2026.

BRASIL. Exército. Estado-Maior do Exército. Co**nceito Operacional do Exército Brasileiro (EB20-MF-07.101)**. 2. ed. Brasília, DF: EME, 2026c.

CHEN, Y.; YANG, H.; ZHAO, H. **Quantum radar technology and its developments**. *In*: International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS). Chengdu: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/ICCCAS.2013.6765317.

CHESBROUGH, H. W. The era of open innovation. **MIT Sloan Management Review**, v. 44, n. 3, p. 35–41, 2003.

CHOI, D. **Quantum technology and the military - revolution or hype?** The impact of emerging quantum technologies on future warfare. Expeditions with MCUP, 2023. DOI: 10.36304/ExpwMCUP.2023.11.

COSTA, G. A. de B.; AZEVEDO, C. E. F.; ARAÚJO-MOREIRA, F. M. Tecnologia quântica e defesa nacional: oportunidades e desafios para o Brasil. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, v. 23, n. 67, p. 275–299, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.16384321.

DE WECK, O. L. **Technology Roadmapping and Development**: A Quantitative Approach to the Management of Technology. 1. ed. Cham: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-88346-1.

DEGEN, C. L.; REINHARD, F.; CAPPELLARO, P. Quantum sensing. **Reviews of Modern Physics**, v. 89, n. 3, 035002, 2017.

DEUTSCH, D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. **Proceedings of the Royal Society of London A**, v. 400, n. 1818, p. 97–117, 1985.

DOWLING, J. P.; MILBURN, G. J. Quantum technology: the second quantum revolution. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 361, n. 1809, p. 1655–1674, 2003.

EKERT, A. K. Quantum cryptography based on Bell's theorem. Physical Review Letters, v. 67, n. 6, p. 661–663, 1991.

ERNST, H. The Use of Patent Data for Technological Forecasting: The Diffusion of CNC-Technology in the Machine Tool Industry. **Small Business Economics**, v. 9, n. 4, p. 347–363, 1997. DOI: 10.1023/A:1007921808138.

ETZKOWITZ, H.; LEYDESDORFF, L. **The triple helix**: University-industry-government innovation in action. London: Routledge, 1995.

EUROPEAN COMMISSION. St**rategic Research and Industry Agenda (SRIA 2030) for Quantum Technologies**. Paris: Quantum Flagship, 2024.

EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE. **Quantum**: what is it and where does the EU stand? Brussels: EPRS, 2024.

FEYNMAN, R. P. Simulating physics with computers. I**nternational Journal of Theoretical Physics**, v. 21, n. 6/7, p. 467–488, 1982.

GIOVANNETTI, V.; LLOYD, S.; MACCONE, L. Advances in quantum metrology. **Nature Photonics**, v. 5, n. 4, p. 222–229, 2011.

GIRARDI, R.; FRANÇA JUNIOR, J. A.; GALDINO, J. F. A gestão da inovação de defesa no Brasil: estudo de caso do Exército Brasileiro. nn, Campinas, v. 25, e026010, 2026. DOI: 10.20396/rbi.v25i00.8676860.

GIRARDI, R.; GALDINO, J. F. A "dualidade" da dualidade tecnológica: implicações para países em desenvolvimento. **Coleção Meira Mattos**, v. 18, n. 62, p. 189–216, 2024. DOI: 10.52781/cmm.a130.

GIRARDI, R.; GALDINO, J. F.; PELLANDA, P. C. **The Front End of Innovation in Defense**: A Comprehensive Literature Review. *In*: BURT, S. (org.). National Security in the Digital and Information Age. London: IntechOpen, 2024. p. 37–61. DOI: 10.5772/intechopen.1005191.

GODIN, B. The Linear Model of Innovation. **Science, Technology, & Human Values**, v. 31, n. 6, p. 639–667, 2006. DOI: 10.1177/0162243906291865.

GOVINDARAJAN, V.; TRIMBLE, C. **Reverse Innovation**: Create Far From Home, Win Everywhere. 1. ed. Boston: Harvard Business Review Press, 2012.

GROVER, L. K. **A fast quantum mechanical algorithm for database search**. *In*: Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC). 1996. p. 212–219.

IEEE. **IEEE Taxonomy Version 1.05**. 2025. Disponível em: https://www.ieee.org/content/dam/ieee-org/ieee/web/org/pubs/ieee-taxonomy.pdf. Acesso em: 17 maio 2025.

IISS. **Securing the quantum stack**: export controls, choke points and strategic competition. Londres: International Institute for Strategic Studies, 2026. Disponível em: https://www.iiss.org/online-analysis/online-analysis/2026/07/securing-the-quantum-stack-export-controls-choke-points-and-strategic-competition/. Acesso em: 30 ago. 2026.

IME. **Instituto Militar de Engenharia ativa canal quântico pioneiro e avança rumo à Internet Quântica no Brasil**. Rio de Janeiro: IME, 2025. Disponível em: https://www.ime.eb.mil.br/home/noticias/ime-internet-quantica-no-brasil. Acesso em: 28 ago. 2026.

KANIA, E. B. **Quantum Hegemony?** China's Ambitions and the Challenge to U.S. Innovation Leadership. Washington, DC: Center for a New American Security, 2020.

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

KRELINA, M. **Military and Security Dimensions of Quantum Technologies**: A Primer. Stockholm: SIPRI, 2025. DOI: 10.55163/ZVTL1529.

KRELINA, M.; DÚBRAVČÍK, D. Quantum technology for defence: what to expect for the air and space domains. **The Journal of the JAPCC**, n. 35, p. 39–46, 2023. Disponível em: https://www.japcc.org/articles/quantum-technology-for-defence/. Acesso em: 26 ago. 2026.

LIAO, S.-K. et al. Satellite-relayed intercontinental quantum network. **Physical Review Letters**, v. 120, n. 3, 030501, 2018. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.030501.

LLOYD, S. Universal quantum simulators. **Science**, v. 273, n. 5278, p. 1073–1078, 1996.

MADEU, F. C. B.; PELLANDA, P. C.; PASSOS, A. C. Prospecção tecnológica utilizando análise de patentes e o método AHP: estudo de caso dos materiais de carbono para o setor de defesa. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 38, n. 1, p. 14–30, 2021.

MOSCA, M. Cybersecurity in an era with quantum computers: will we be ready? **IEEE Security & Privacy**, v. 16, n. 5, p. 38–41, 2018.

NATO. **New focus on emerging and disruptive technologies helps prepare NATO for the future**. 2021. Disponível em: https://www.nato.int/en/news-and-events/articles/news/2021/03/03/new-focus-on-emerging-and-disruptive-technologies-helps-prepare-nato-for-the-future. Acesso em: 25 ago. 2026.

NATO. **Science & Technology Trends 2023-2043**. 2023. Disponível em: https://technology-observatory.ch/science-technology-trends-2023-2043. Acesso em: 19 nov. 2025.

NATO. **NATO releases first ever quantum strategy**. 2024. Disponível em: https://nato.int/cps/en/natohq/news_221601.htm. Acesso em: 25 ago. 2026.

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

OLIVEIRA, T. F. D.; AZEVEDO, C. E. F.; ARAÚJO-MOREIRA, F. M. O papel das tecnologias quânticas na disputa geopolítica entre grandes potências e seu impacto na defesa do Brasil. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 22, n. 65, p. 267–290, 2025.

OLIVEIRA, T. F. D.; AZEVEDO, C. E. F.; ARAÚJO-MOREIRA, F. M. Tecnologias quânticas na defesa do Brasil: desafios, oportunidades e roadmap. **Revista Brasileira de Estudos de Defesa**, v. 13, e026007, p. 1–37, 2026.

PIRANDOLA, S. et al. Advances in quantum cryptography. **Advances in Optics and Photonics**, v. 12, p. 1012–1236, 2020. DOI: 10.1364/AOP.361502.

PRESKILL, J. **Quantum computing in the NISQ era and beyond**. Quantum, v. 2, p. 79, 2018.

RALEGANKAR, V. K. et al. Quantum Cryptography-as-a-Service for Secure UAV Communication: Applications, Challenges, and Case Study. **IEEE Access**, v. 10, p. 1475–1492, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3138753.

RUSI. **Export controls accelerate China's quantum supply chain**. Londres: Royal United Services Institute, 2025. Disponível em: https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/export-controls-accelerate-chinas-quantum-supply-chain. Acesso em: 30 ago. 2026.

SCHLEICH, W. P. et al. Quantum technology: from research to application. **Applied Physics B,** v. 122, n. 5, p. 130, 2016. DOI: 10.1007/s00340-016-6353-8.

SHOR, P. W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. **SIAM Journal on Computing**, v. 26, n. 5, p. 1484–1509, 1997.

SQUEFF, F. H. S. **Sistema Setorial de Inovação em Defesa**: análise do caso do Brasil. In: DE NEGRI, F.; SQUEFF, F. H. S. (org.). Sistemas setoriais de inovação e infraestrutura de pesquisa no Brasil. Brasília: IPEA, 2016. p. 63–113.

SWAYNE, M. **Pentagon Elevates Quantum Tech to Core of Future Battlefield Strategy**. 2025. Disponível em: https://thequantuminsider.com/2025/11/18/pentagon-elevates-quantum-tech-to-core-of-future-battlefield-strategy. Acesso em: 21 nov. 2025.

UNITED STATES. **Commerce lists entities involved in the support of PRC military quantum computing applications, Pakistani nuclear and missile proliferation, and Russia's military**. Bureau of Industry and Security – U.S. Department of Commerce, 2021. Disponível em: https://www.bis.gov/press-release/commerce-lists-entities-involved-support-prc-military-quantum-computing-applications-pakistani-nuclear. Acesso em: 25 ago. 2026.

UNITED STATES. **Treasury issues regulations to implement Executive Order addressing U.S. investments in certain national security technologies and products in countries of concern**. U.S. Department of the Treasury, 2024a. Disponível em: https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2687. Acesso em: 25 ago. 2026.

UNITED STATES. **Department of Commerce implements controls on quantum computing and other advanced technologies alongside international partners**. Bureau of Industry and Security. U.S. Department of Commerce, 2024b. Disponível em: https://www.bis.gov/press-release/department-commerce-implements-controls-quantum-computing-other-advanced-technologies-alongside. Acesso em: 25 ago. 2026.

WEHNER, S.; ELKOUSS, D.; HANSON, R. Quantum internet: a vision for the road ahead. **Science**, v. 362, n. 6412, eaam9288, 2018.

WIPO. **World Intellectual Property Indicators 2024**. 2025. Disponível em: https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4759. Acesso em: 19 nov. 2025.

WOOTTERS, W. K.; ZUREK, W. H. A single quantum cannot be cloned. **Nature**, v. 299, n. 5886, p. 802–803, 1982.

APÊNDICE A – *STRINGS* DE BUSCA

Produção científica (Scopus): TITLE-ABS-KEY(“quantum” AND ([Termos da defesa, se necessário]) AND ([Termos complementares, se necessário])) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND (EXCLUDE(DOCTYPE, “er”) OR EXCLUDE(DOCTYPE, “tb”))

Produção tecnológica (PATENTSCOPE): FP:(“quantum” AND ([Termos da defesa, se necessário]) AND ([Termos complementares, se necessário])) AND AD:([01.01.2014 TO 31.12.2024])

Termos da defesa	
“military” OR “national defense” OR “national defence” OR “national security” OR “armed force” OR “navy” OR “army” OR “air force”	
Termos complementares de área de pesquisa	
Computação quântica	“computing” OR “computer” OR “qubit” OR “superconducting” OR “transmon” OR “fluxonium” OR “trapped-ion” OR “neutral atom” OR “Rydberg” OR “NV center” OR “donor in silicon” OR “error correction” OR “fault-toleran” OR “surface code” OR “variational” OR “VQE” OR “QAOA” OR “anneal” OR “compiler” OR “randomized benchmarking” OR “cross-entropy benchmark” OR “circuit” OR “algorithm” OR “gate” OR “processor” OR “hardware” OR “logic” OR “control” OR “parallelism” OR “programming” OR “register” OR “instruction” OR “acceleration” OR “software stack” OR “chip” OR “device” OR “architecture”
Simulação quântica	“simulation” OR “simulator” OR “digital-analog” OR “emulator” OR “Hamiltonian” OR “optical lattice” OR “cold atom” OR “Hubbard model” OR “lattice gauge” OR “Bose-Einstein condensate” OR “phase transition” OR “dynamics” OR “state engineering” OR “spin chain” OR “Ising model” OR “many-body localization” OR “Monte Carlo” OR “tensor network” OR “matrix product state” OR “variational ansatz” OR “adiabatic” OR “state evolution”
Comunicações quânticas	“communication” OR “network” OR “internet” OR “repeater” OR “entanglement swapping” OR “QKD” OR “key distribution” OR “BB84” OR “QRNG” OR “satellite” OR “free-space optical” OR “single-photon source” OR “SNSPD” OR “SPAD” OR “time-bin encod” OR “teleportation” OR “entanglement distribution” OR “channel” OR “network architecture” OR “node” OR “repeater chain” OR “photon entanglement” OR “Bell state” OR “decoherence” OR “cryptograph” OR “link layer” OR “protocol” OR “entanglement-assisted communication” OR “memory”
Sensoriamento & metrologia quânticos	“sensor” OR “interferomet” OR “gravimeter” OR “magnetometer” OR “magnetometr” OR “NV center” OR “Rydberg” OR “imaging” OR “squeezed light” OR “radar” OR “lidar” OR “clock” OR “gyroscope” OR “inertial” OR “metrology” OR “quantum-enhanced” OR “precision” OR “timekeeping” OR “spin-based sensing” OR “accelerometer” OR “gravitational wave detection” OR “tomography” OR “photometry” OR “super-resolution imaging” OR “illumination”
Termos complementares de área de aplicação (DEFESA)	
Robótica	“robotic*” OR “autonomous” OR “unmanned” OR “UAV” OR “UGV” OR “drone”
Biotecnologia	“biotechnology” OR “human enhancement” OR “augmented soldier” OR “neuroenhancement” OR “biosensors” OR “wearable” OR “performance enhancement” OR “biological augmentation”
C4ISR e apoio à decisão	“C4ISR” OR “command and control” OR “communication” OR “decision” OR “awareness” OR “planning”
Transporte e logística	“logistic*” OR “storage” OR “supply chain” OR “route planning” OR “fleet” OR “transportation” OR “shipping” OR “warehouse automation” OR “vehicle” OR “motor”
Simulação	“simulation” OR “gam*” OR “augmented reality” OR “virtual reality” OR “mixed reality” OR “extended reality”
Hipersônica e espaço	“hypersonic” OR “missile” OR “high-speed” OR “jet” OR “satellite” OR “space”
Saúde	“medical” OR “medicine” OR “health*” OR “clinic*” OR “radiomics” OR “disease” OR “drug”
Novos materiais	“advanced materials” OR “composite” OR “stealth” OR “additive manufacturing” OR “nanomaterials” OR “ballistic protection”
Cibernética	“cyber”

Autoria

1 Fernando Araújo-Moreira

Graduação em Analista de Sistemas IBM pela Universidad ORT Uruguay; Graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos; Coordenador de Pesquisa em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia; Coordenador do GTTI Tecnologias Quânticas do Ministério da Defesa; Coordenador da rede Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas; Mestrado em Física pela Universidade Federal de São Carlos; Doutor em Física pela Universidade Federal de São Carlos; Professor
https://orcid.org/0000-0002-5423-0405 • fernando.manuel@ime.eb.br

2 Juraci Ferreira Galdino

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande; Comandante e Reitor
https://orcid.org/0000-0001-7805-0452 • galdino.juraci@eb.mil.br

3 Carlos Eduardo Franco-Azevedo

Doutor em Administração pela Escola Brasileira de Administração Pública; Doutor de Empresas pela Fundação Getúlio Vargas; Vice-Coordenador da rede Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas; Vice-Coordenador do Grupo de Trabalho de Tecnologias Quânticas do Ministério da Defesa; Professor
https://orcid.org/0000-0002-8021-0723 • francoazevedo@francoazevedo.com.br

4 Rômullo Girardi Moreira

Doutor em Engenharia de Defesa pelo Instituto Militar de Engenharia; Professor
https://orcid.org/0000-0002-6657-2832 • romullogirardi@ime.eb.br

Como citar este artigo

ARAÚJO-MOREIRA, F.; GALDINO, J. F.; FRANCO-AZEVEDO, C. E.; MOREIRA, R. G. Tecnologias quânticas para defesa: análise e prospecção de soluções para o Exército. **InterAção**, Santa Maria, v. 17, n. 3, e98673, p. 1-46, 2026. DOI 10.5902/2357797598673. Disponível em: https://dx.doi.org/10.5902/2357797598673. Acesso em: dia mês abreviado. ano.