ARTIGO DOI 10.52781/cmm.a204

Tecnologia quânticas e Defesa Nacional: o papel de instituições militares na cooperação civil-militar no Brasil

Quantum Technologies and National Defense: The Role of Military Institutions in Civil-Military Cooperation in Brazil

Resumo: Esta pesquisa analisa como as instituições militares brasileiras contribuem para a cooperação civil-militar no desenvolvimento de tecnologias quânticas aplicadas à defesa nacional. O objetivo geral é compreender o papel das Forças Armadas na construção dessa relação no setor de defesa. Especificamente, busca-se 1) apresentar como as instituições desenvolvem modelos de aplicação das tecnologias quânticas, 2) analisar o funcionamento das iniciativas existentes e 3) propor recomendações para fortalecer a cooperação civil-militar como estratégia de desenvolvimento tecnológico. A metodologia é qualitativa, de caráter exploratório, baseada em análise documental (da Política Nacional de Defesa e da Estratégia Nacional de Defesa), revisão bibliográfica e levantamento de dados institucionais de atores como o Instituto Militar de Engenharia (IME), a Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME), a Rede Nacional de Pesquisa Quântica (Rede Rio Quântica) e o projeto Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas (IATQ). O estudo contextualiza a evolução das tecnologias quânticas, examina suas aplicações militares emergentes e compara as estratégias adotadas por Estados Unidos e China. Os resultados indicam que as instituições militares são atores estratégicos na articulação do ecossistema quântico brasileiro.

Palavras-chave: Tecnologias quânticas; Cooperação civil-militar; Defesa Nacional; Inovação em defesa; Triangulação de fontes.

Abstract: This research analyzes how Brazilian military institutions contribute to civil-military cooperation in the development of quantum technologies applied to national defense. The general objective is to understand the role of the Armed Forces in building this relationship within the defense sector. Specifically, it aims to 1) present how institutions develop models for applying quantum technologies, 2) analyze the functioning of existing initiatives, and 3) propose recommendations to strengthen civil-military cooperation as a technological development strategy. The methodology is qualitative and exploratory, based on document analysis (National Defense Strategy, National Defense Policy), literature review, and institutional data from actors such as the Instituto Militar de Engenharia (IME), the Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME), the Rede Nacional de Pesquisa Quântica (Rede Rio Quântica), and the project Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas (IATQ). The study contextualizes the evolution of quantum technologies, examines their emerging military applications, and compares the strategies adopted by the United States and China. Findings indicate that the military institutions are strategic actors in fostering knowledge transfer, dual-use capabilities, and technological sovereignty in Brazil's quantum ecosystem.

Keywords: Quantum technologies; Civil-Military cooperation; National Defense; Defense innovation; Source triangulation.

Myrel Richard Alves dos Santos
Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME).
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
myrelrichard20@gmail.com

Rachel Soares
Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME).
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
rachelcamillyss@gmail.com

Thays Felipe David de Oliveira
Instituto Militar de Engenharia (IME).
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
Thays.felipe@ime.eb.br

Recebido: 30 jun. 2025
Aprovado: 09 abr. 2026

COLEÇÃO MEIRA MATTOS
ISSN on-line 2316-4891 / ISSN print 2316-4833
https://colecaomeiramattos.com.br/

Creative Commons Attribution Licence

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, as inovações tecnológicas contribuíram para mudanças na estrutura das relações entre os Estados. Da pólvora à energia nuclear e do radar à inteligência artificial (IA), a incorporação de novas tecnologias aos aparatos militares marca reflexões nos modos de fazer guerra e nos parâmetros da defesa. Nesse ambiente, o campo das tecnologias quânticas (TQ) apresenta implicações para a soberania informacional, a resiliência cibernética e a superioridade dos Estados.

As TQ se baseiam em princípios fundamentais da mecânica quântica, como superposição, emaranhamento e o princípio da incerteza, que desafiam as intuições clássicas da física (Smith III, 2020). Essas propriedades abrem caminho para um novo leque de aplicações envolvendo as capacidades militares, incluindo sensores de alta precisão, sistemas de navegação independentes do Global Positioning System (GPS), redes de comunicação invioláveis e computadores com poder de processamento exponencial. Embora muitas dessas aplicações ainda estejam em estágios iniciais de desenvolvimento, o ritmo acelerado da pesquisa e a competição geopolítica pela liderança tecnológica indicam que a janela de oportunidade para a inserção estratégica é estreita.

Nesse cenário tecnológico, o setor de defesa caracteriza-se como impulsionador e demandante de soluções quânticas, pela natureza sensível das informações que manuseia (Brito; Ferreira; Chaves, 2023). A busca por superioridade decisória, situacional e cibernética faz com que as Forças Armadas de países como Estados Unidos (EUA) e China invistam na exploração militar dessas tecnologias, inclusive com a criação de centros especializados, programas de financiamento estratégico e mecanismos de proteção da base industrial.

No contexto brasileiro, embora a agenda de TQ ainda esteja em fase incipiente, observa-se a mobilização de atores estratégicos, como o Instituto Militar de Engenharia (IME), o Comando de Defesa Cibernética (ComDCiber), a Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME) e a Rede Nacional de Pesquisa Quântica (Rede Rio Quântica) (Brasil, 2025d). Essas instituições têm buscado, por meio de projetos, programas de formação e parcerias com universidades, impulsionar o desenvolvimento nacional nessa área. No entanto, persistem desafios relacionados à interoperabilidade – entendida como a capacidade de diferentes sistemas e organizações colaborarem entre si, permitindo a troca de informações de forma eficiente e integrada (Mello, 2015) –, sendo a cooperação civil-militar um dos vetores centrais para sua viabilização.

Posto isso, esta pesquisa busca responder à seguinte pergunta: como as instituições militares brasileiras contribuem para a construção da cooperação civil-militar no desenvolvimento de tecnologias quânticas aplicadas à defesa nacional? O objetivo geral consiste em analisar o papel dessas instituições militares na relação civil-militar no campo do desenvolvimento das TC no setor de defesa brasileiro. Para isso, propõem-se três objetivos específicos: 1) apresentar como as instituições têm desenvolvido modelos para a utilização das TQ no setor de defesa; 2) examinar o funcionamento das propostas existentes no âmbito da defesa; e 3) indicar recomendações para o fortalecimento da cooperação civil-militar como estratégia de desenvolvimento tecnológico no setor.

Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa de caráter exploratório (Godoy, 1995; Gil, 2008). O desenho metodológico privilegia a triangulação de fontes como estratégia para ampliar a robustez analítica (Abdalla *et al*., 2018; Azevedo *et al*., 2013), estruturada em três eixos: análise documental, revisão bibliográfica e levantamento de dados institucionais.

O primeiro eixo compreende a análise de documentos oficiais de planejamento estratégico de defesa nacional, selecionados por sua relevância normativa e pelo papel estruturante que exercem na orientação das políticas públicas do setor. Foram analisadas a Estratégia Nacional de Defesa (END) nas edições de 2008, 2012 e 2020, e a Política Nacional de Defesa (PND) nas edições de 2012 e 2020. A análise foi orientada pela identificação de referências a tecnologias estratégicas, capacitação científica e arranjos de cooperação civil-militar.

O segundo eixo envolveu a revisão de literatura nas áreas de inovação em defesa, relações civil-militares e tecnologias quânticas, com buscas realizadas nas bases Web of Science, Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, Portal de Periódicos da CAPES e Google Acadêmico. Os critérios de seleção priorizaram publicações que articulassem dimensões tecnológicas, institucionais e de segurança nacional, com ênfase em trabalhos empíricos e comparativos. A busca bibliográfica utilizou *strings* estruturadas em inglês e português: "*Quantum Technologies"; "National Defense"; "Civil-military cooperation"; "Defense innovation"; "Brazilian defense policy"*.

O terceiro eixo contemplou o levantamento de dados em instituições militares e científicas brasileiras diretamente envolvidas com tecnologias quânticas, a saber: IME, ECEME, a Rede Rio Quântica e o projeto IATQ. As fontes consultadas incluem documentos institucionais, relatórios de projetos e acervo técnico de acesso público.

A triangulação operou pela convergência e pelo contraste entre esses três eixos: os documentos oficiais forneceram o quadro normativo; a literatura forneceu o referencial analítico; e os dados institucionais forneceram a indicação empírica sobre as iniciativas em curso. Os exemplos internacionais mobilizados ao longo do texto cumprem função analítica ilustrativa, sendo utilizados para contextualizar as escolhas e lacunas do modelo brasileiro frente a experiências consolidadas em outros países, sem configurar estudo de caso aprofundado.

Embora o modelo da Tríplice Hélice ofereça um importante lente analítica para compreender essa dinâmica, a estruturação da cooperação civil-militar no campo das tecnologias quânticas não se limita a esse arranjo. Outras formas de inovação coexistem, incluindo modelos lineares de transferência de tecnologia e iniciativas conduzidas diretamente pelo setor privado. No entanto, no caso específico das TQ aplicadas à defesa, caracterizadas como tecnologias críticas e sensíveis, observa-se uma tendência de maior coordenação entre Estado, instituições militares e academia, dada a complexidade técnica, os elevados custos e as implicações estratégicas envolvidas (Etzkowitz; Zhou, 2017).

A importância deste estudo reside na necessidade de compreender como a modernização da defesa nacional pode ser impulsionada pela articulação entre academia, indústria e governo. A consolidação de capacidades quânticas demanda visão de longo prazo, investimentos sustentados e sinergia entre os diversos setores do Estado. Dessa forma, ao examinar o papel das instituições militares nessa interface, este trabalho contribui para o debate sobre a construção de uma base nacional de defesa tecnocientífica autóctone.

Não obstante, observa-se uma lacuna na literatura especializada: os estudos sobre TQ aplicadas à defesa concentram-se predominantemente nas estratégias de grandes potências, como Estados Unidos e China, sem examinar o papel específico das instituições militares de países em desenvolvimento na construção de ecossistemas nacionais de inovação quântica (Krelina, 2021; Parker *et al*., 2022).

Paralelamente, a literatura sobre cooperação civil-militar no Brasil privilegia setores já consolidados, como o nuclear, o aeroespacial e o cibernético, sem abordar sistematicamente as tecnologias quânticas como vetor emergente dessa relação (Hing, 2010; Moura, 2024). A interseção entre essas duas agendas, o papel das instituições militares brasileiras na promoção da cooperação civil-militar no campo quântico, permanece pouco explorada na produção acadêmica nacional e internacional. É nessa lacuna que este trabalho se insere ao sugerir uma análise das iniciativas, dos arranjos institucionais e dos desafios que estruturam essa cooperação no contexto brasileiro.

2 TECNOLOGIAS QUÂNTICAS E O SETOR DE DEFESA

Ao final do século XIX, a física clássica enfrentava debates teóricos que não podiam ser resolvidos com ferramentas conceituais. Fenômenos como o espectro da radiação de corpo negro, o efeito fotoelétrico e a estabilidade dos átomos revelaram lacunas nas teorias existentes. Foi nesse contexto que Planck (1858-1947), em 1900, propôs que a energia não era emitida de forma contínua, mas em pacotes discretos denominados quanta (Carson, 2000).

Em 1905, Einstein (1879-1955) ampliou essa ideia ao explicar o efeito fotoelétrico, demonstrando o comportamento corpuscular da luz e levando à concepção do fóton. Já em 1913, Bohr (1885-1962) incorporou a quantização ao modelo atômico, sugerindo que os elétrons orbitavam o núcleo em níveis discretos e que suas transições explicavam os espectros atômicos (Kragh, 1999).

Entre 1925 e 1928, a mecânica quântica foi formulada por Heisenberg (1925), Schrödinger (1926) e Dirac (1928). Heisenberg (1925) desenvolveu a mecânica matricial, enquanto Schrödinger (1926) formulou a equação de onda que leva seu nome; já Dirac (1928) unificou a mecânica quântica com a teoria da relatividade especial. Essas contribuições estabeleceram os fundamentos formais da primeira revolução quântica, introduzindo conceitos como superposição, emaranhamento e o princípio da incerteza; este último responsável por eliminar a previsibilidade absoluta do universo físico (Chibeni, 1992; Jammer, 1966).

A Segunda Revolução Quântica marca uma nova era centrada na manipulação de estados individuais de partículas, especialmente o entrelaçamento, que se tornou o pilar das inovações contemporâneas em computação quântica, criptografia quântica e metrologia ultraprecisa (Intonti, 2024). A partir da década de 1980, Feynman (1918-1988) argumentou que apenas um sistema governado pelas leis quânticas poderia simular eficientemente outro sistema quântico, lançando as bases para os computadores quânticos e influenciando o uso de superposição e entrelaçamento em tarefas computacionais (Caldeira, 2018). Paralelamente, Bennett e Brassard propuseram, em 1984, o protocolo BB84, que estabeleceu os fundamentos da criptografia quântica ao demonstrar que a mecânica quântica poderia garantir comunicações absolutamente seguras, consolidando-se como uma das áreas centrais dessa nova revolução (Rigolin; Rieznik, 2005).

A ascensão das TQ na defesa representa uma transição estratégica silenciosa, porém profunda, cujas implicações superam a mera introdução de novos equipamentos e reformulam a doutrina de operações terrestres. Trata-se de uma transformação na base informacional, sensorial e decisória das Forças Armadas, com potencial para redefinir os parâmetros operacionais contemporâneos. Computação quântica, sensores ultrassensíveis e comunicações invioláveis surgem

como vetores de superioridade funcional, elevando exponencialmente a precisão, a velocidade e a segurança dos sistemas militares (Krelina, 2021).

No campo da comunicação, a Quantum Key Distribution (QKD) garante níveis inéditos de segurança ao permitir a detecção de qualquer tentativa de interceptação, deslocando a lógica da criptografia de uma abordagem baseada em complexidade computacional (Krelina, 2021). Protocolos como a QKD asseguram a detecção imediata de qualquer tentativa de interceptação, oferecendo uma vantagem estratégica significativa em cenários operacionais sensíveis (Neumann; van Heesch; de Graaf, 2023).

Observa-se, entretanto, que a incorporação dessas tecnologias apresenta desafios. A suscetibilidade dos sistemas orbitais a armas de energia dirigida e interferências eletromagnéticas reforça a necessidade de arquiteturas robustas e sistemas defensivos sofisticados. Além disso, o avanço dos processadores quânticos capazes de quebrar cifras convencionais demanda investimentos em criptografia pós-quântica e protocolos de segurança resilientes. Assim, apesar do estágio experimental de muitas dessas inovações, seu potencial exige acompanhamento contínuo (Krelina, 2023).

Nessa esfera da corrida tecnológica, os Estados Unidos e a China se posicionam como líderes globais. De acordo com as contribuições de Julienne (2024), a China tem promovido a aplicação da QKD, por exemplo, por meio da rede conhecida como Jing-Hu Trunk Line, considerada a maior infraestrutura terrestre de comunicação quântica do mundo. Essa rede conecta cidades estratégicas como Pequim e Xangai ao longo de mais de 2.000 quilômetros de fibra óptica, permitindo a distribuição segura de chaves criptográficas com base em princípios da mecânica quântica, como o entrelaçamento e a impossibilidade de medição sem perturbação do sistema. Na prática, isso significa que qualquer tentativa de interceptação da comunicação pode ser imediatamente detectada, elevando significativamente o nível de segurança das transmissões. Além de sua escala, a Jing-Hu Trunk Line integra-se a outras iniciativas chinesas, como o satélite quântico Micius, formando uma arquitetura híbrida (terrestre e espacial) voltada à construção de uma infraestrutura nacional de comunicações invioláveis. Esse avanço posiciona a China na vanguarda das comunicações quânticas e evidencia o uso estratégico dessas tecnologias para garantir soberania informacional, proteção de dados sensíveis e vantagem geopolítica no domínio cibernético. Empresas privadas importantes, como a Alibaba, abandonaram suas divisões quânticas, enquanto o governo tenta centralizar o setor por meio de empresas estatais, como a recém-criada China Telecom Quantum Group. Soma-se a isso o isolamento crescente provocado pelas tensões geopolíticas e pelas sanções ocidentais, que dificultam o acesso a insumos estratégicos, como refrigeradores de diluição (Julienne, 2024).

Os Estados Unidos têm adotado uma estratégia robusta de desenvolvimento da base industrial quântica. Segundo os Estados Unidos (2021) a partir da National Quantum Initiative, o país tem investido em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com financiamento que ultrapassou US$ 700 milhões em 2021. Essas iniciativas são conduzidas por agências civis, como a National Science Foundation (NSF), por órgãos de defesa, como a Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), e pela comunidade de inteligência, como a National Security Agency (NSA).

No setor privado, os Estados Unidos têm promovido uma rede composta por mais de 180 empresas. Algumas delas participam de consórcios com universidades e laboratórios nacionais, como o Quantum Economic Development Consortium (QED-C), que visam acelerar a

maturação tecnológica e sua conversão em aplicações de defesa (Parker *et al*., 2022). Ressalta-se que, diferentemente da China, os Estados Unidos apresentam uma liderança na iniciativa privada em relação à implementação tecnológica. Já no Estado asiático, as empresas privadas desempenham papel limitado, com poucas companhias relevantes, como Quantum CTek e Origin Quantum (Parker, 2024).

Em 2024, a indústria quântica global arrecadou aproximadamente US$ 1,5 bilhão em receitas provenientes de computação quântica e sensoriamento, com previsão de crescimento de cerca de 25% ao ano, sustentada por um ecossistema que já emprega mais de 200 mil profissionais e conta com investimentos privados de US$ 2,6 bilhões e públicos de US$ 44,5 bilhões (Sri International, 2024).

Paralelamente, a China consolidou sua posição dominante em comunicações quânticas, destacando-se com uma vasta rede de distribuição de chaves quânticas e o satélite Micius, investindo mais de US$ 15 bilhões em pesquisa pública nesse campo. No sensoriamento, a competitividade do país está no mesmo patamar dos Estados Unidos, embora ainda fique atrás em computação quântica, área na qual os o Estado americano mantêm vantagem em hardware e qualidade de pesquisa (Omaar; Makaryan, 2024).

A supremacia tecnológica tornou-se um imperativo estratégico para preservar a influência global dos Estados Unidos, especialmente diante da intensificação da competição com a China. A articulação entre inovação e defesa nacional exige que o Estado americano atue de forma coordenada na proteção das cadeias de suprimento, na formação de capital humano e na aceleração da conversão da pesquisa básica em aplicações práticas (Schmidt, 2023).

O Brasil tem dado os primeiros passos no fomento de estudos para o desenvolvimento de TQ com aplicações em defesa por meio de iniciativas que envolvem instituições civis e militares. Entre os principais marcos dessa trajetória, destacam-se o projeto IATQ, o programa Pró-Defesa V, a Rede Rio Quântica, e o crescente protagonismo de instituições como o IME, o ComDCiber e a ECEME.

O projeto IATQ, financiado pelo Pró-Defesa V (CAPES/Ministério da Defesa), tem como objetivo desenvolver uma rede de pesquisa focada em tecnologias disruptivas – conceituadas como aquelas capazes de promover rupturas significativas nos paradigmas tecnológicos existentes e gerar novas capacidades estratégicas e operacionais (Girardi; França Junior; Galdino, 2024). A IA e as TQ figuram como os eixos centrais desse esforço. O projeto é dividido em quatro dimensões: Estudos Estratégicos e Políticas Públicas aplicadas à Defesa; Ciência, Tecnologia e Inovação aplicadas à Defesa; Pesquisa, Desenvolvimento, Inovação e Avaliação; e Capacitação.

O IATQ articula instituições como o IME, o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), a ECEME, a Universidade da Força Aérea (UNIFA), a Escola Superior de Guerra (ESG), a Escola Superior de Defesa (ESD); bem como a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a Universidade Federal do Amazonas (UFAM), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade de Brasília (UnB).

Paralelamente, a Rede Rio Quântica representa um dos principais experimentos de infraestrutura quântica da América Latina ao estabelecer um sistema de comunicação segura baseado em QKD por meio de fibras ópticas. Coordenada pelo Prof. Antonio Zelaquett Khoury (IF/UFF), a rede

reúne instituições como a Universidade Federal Fluminense (UFF), o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), o IME e o ITA, além de contar com o acompanhamento estratégico do ComDCiber.

A Rede Hermes Quântica é um projeto pioneiro do IME que visa estabelecer uma rede metropolitana de comunicação quântica baseada em QKD. A proposta busca testar a viabilidade técnica da criptografia quântica em território nacional, mas também avaliar sua aplicação em redes de comando e controle militares e comunicações críticas, ampliando a resiliência do sistema de defesa brasileiro frente a ameaças cibernéticas e tecnologias emergentes (Brasil, 2024a).

O IME concentra esforços na pesquisa e no desenvolvimento tecnológico, enquanto o ComDCiber e a ECEME atuam na articulação entre atores e na incorporação das tecnologias às demandas estratégicas. Longo e Moreira (2013) destacam que o setor de defesa brasileiro apresenta um sistema de inovação ainda em formação, no qual as instituições militares tendem a ocupar o espaço que, em países mais avançados, é preenchido por uma indústria privada consolidada. No campo quântico, isso se torna ainda mais perceptível, dado o estágio inicial do ecossistema nacional.

A corrida quântica, já intensificada entre as grandes potências, impõe aos Estados uma postura proativa de formulação de políticas públicas, fortalecimento de ecossistemas científicos e integração entre capacidades civis e militares. No caso brasileiro, as iniciativas ainda embrionárias apontam caminhos promissores, mas exigem articulação institucional, continuidade de investimentos e visão estratégica de longo prazo (Abelém, 2026). Nesse sentido, o aprofundamento da cooperação entre os setores civil e militar surge como dimensão crítica para viabilizar a transferência de conhecimento, acelerar a maturação tecnológica e garantir que as aplicações quânticas estejam alinhadas com os objetivos de defesa nacional. É sobre esse ponto que se debruça a próxima seção, ao examinar os fundamentos, os desafios e as oportunidades da cooperação civil-militar no campo das TQ.

3 COOPERAÇÃO CIVIL-MILITAR COMO ESTRATÉGIA DE INOVAÇÃO NA DEFESA

A defesa desempenha um papel importante na segurança e soberania de um país. Ela é composta por uma teia complexa de relações entre instituições e empresas, públicas ou privadas. Nesse contexto, a interação entre os setores de cooperação civil e militar (CIMIC) – conhecida como dualidade civil-militar – tem ganhado destaque nas diretrizes oficiais brasileiras, como a Política Nacional de Defesa (PND) e a Estratégia Nacional de Defesa (END). Essas diretrizes apontam que a cooperação entre os dois setores é fundamental para o fortalecimento da Base Industrial de Defesa (BID), ampliando a autonomia tecnológica, a capacidade produtiva nacional e a competitividade empresarial (Brasil, 2020).

A CIMIC pode ser compreendida como a interação estruturada entre atores civis (universidades, centros de pesquisa, empresas de base tecnológica) e instituições militares (Forças Armadas, institutos militares de pesquisa, centros de doutrina), com vistas à construção de capacidades conjuntas. No setor de defesa, essa cooperação é orientada tanto pela demanda por tecnologias de uso dual (civil e militar) quanto pela necessidade de otimização dos recursos e pela redução da dependência tecnológica externa (Hing, 2010).

As instituições militares brasileiras estruturam a cooperação civil-militar no desenvolvimento de TQ por meio de um conjunto articulado de iniciativas institucionais, projetos estratégicos e parcerias técnico-científicas que vão além de mecanismos formais de cooperação. Essa articulação não se limita à celebração de acordos institucionais, mas se materializa na construção de capacidades tecnológicas concretas, na formação de redes de pesquisa e no desenvolvimento de infraestrutura científica voltada à soberania tecnológica nacional. Nesse sentido, destaca-se o protagonismo do IME, que atua como um dos principais polos de integração entre o setor de defesa e a comunidade científica civil, estabelecendo parcerias com diversas instituições, como a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a USP, o Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (CIMATEC), o Instituto Federal do Amazonas (IFAM), a UFPE e o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), além de universidades vinculadas à Rede Rio Quântica (Brasil, 2024a).

Essa cooperação se expressa em projetos como a Rede Rio Quântica (RRQ) e a Rede Hermes Quântica (RHQ). Enquanto a RRQ representa um esforço inicial de articulação institucional e experimental, a RHQ introduz desafios tecnológicos mais sofisticados voltados à consolidação de uma infraestrutura de comunicações quânticas com aplicações estratégicas. Essas iniciativas auxiliam na organização do ambiente científico-tecnológico nacional e na criação de competências críticas para o avanço futuro dessas tecnologias (Moreira; Carneiro; Galdino, 2025).

Nesse contexto, a criação do laboratório de tecnologias quânticas do Exército Brasileiro no IME constitui um marco estratégico para o setor de defesa, representando um grande investimento nacional na área. Esse laboratório viabiliza pesquisas em comunicações e sensores quânticos, com o objetivo de dominar todo o ciclo de desenvolvimento dessas tecnologias, desde a pesquisa básica até as aplicações de interesse militar. Projetos como o desenvolvimento de emissores de fótons únicos, voltados, por exemplo, à futura implementação da RHQ, ilustram como a cooperação civil-militar se traduz em entregas tecnológicas concretas (Brasil, 2024a).

Além disso, a cooperação é estruturada por meio da produção científica e da circulação de conhecimento entre os setores civil e militar. Pesquisadores do IME têm contribuído para o debate estratégico sobre tecnologias quânticas, como pode ser observado em publicações recentes que discutem o tema sob a perspectiva da soberania nacional como Oliveira, Azevedo e Moreira (2025), Costa, Azevedo e Moreira (2025) e Carneiro (2024). Essa dimensão envolve a construção de agendas de pesquisa, a definição de prioridades estratégicas e a consolidação de uma comunidade epistêmica voltada à defesa.

No plano territorial e estratégico, destaca-se ainda a proposta de expansão dessas redes para regiões sensíveis, como a Amazônia, por meio da integração com a infraestrutura do programa Amazônia Conectada. A construção de uma rede metropolitana em Manaus, articulada com universidades locais e órgãos de fomento, revela que a cooperação civil-militar também se organiza a partir de objetivos geopolíticos e de integração nacional, ampliando o alcance das tecnologias quânticas para além dos grandes centros de pesquisa (Brasil, 2024c).

Com base nessas experiências, a cooperação civil-militar no campo das TQ no Brasil já se configura como uma realidade em expansão, sustentada por projetos concretos, investimentos estruturantes e uma crescente articulação institucional. Ela se apresenta como um processo ativo de construção de capacidades tecnológicas, no qual as instituições militares desempenham papel

importante na coordenação, indução e aplicação do conhecimento científico em prol da defesa nacional.

A PND e a END já sofreram diversas alterações. Apesar de serem versões diferentes do mesmo documento, todas enfatizam a necessidade de uma integração civil-militar. A dualidade do setor refere-se à interdependência funcional no decorrer da pesquisa; no desenvolvimento, na produção e na aplicação de tecnologias de interesse para a defesa. Essa relação permite o compartilhamento de competências técnicas, infraestrutura e inovação, promovendo ganhos mútuos que beneficiam tanto o aparato militar quanto o setor produtivo civil (Brasil, 2008).

A boa gestão das atividades na CIMIC necessita de um ambiente institucional propício, com políticas públicas de incentivo, financiamento contínuo e uma visão estratégica compartilhada. No caso das tecnologias quânticas, cuja complexidade técnica e o custo de desenvolvimento são elevados, a CIMIC torna-se uma estratégia não apenas desejável, mas necessária. As instituições militares brasileiras, como o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), o IME e o Centro Tecnológico do Exército (CTEx), têm auxiliado na promoção da CIMIC no campo das tecnologias emergentes. Essas instituições atuam como vetores de integração entre a pesquisa acadêmica civil e as demandas estratégicas do setor de defesa (Brasil, 2025c).

Existem modelos institucionais utilizados para viabilizar a cooperação civil-militar no Brasil. Destacam-se: 1) acordos de Cooperação Técnica (ACTs) entre universidades e Comandos Militares; 2) redes temáticas de pesquisa, como as organizadas no âmbito da Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (ENCTI); e 3) projetos vinculados à Marinha do Brasil e à Força Aérea Brasileira, como o seminário sobre inovações disruptivas e o Núcleo de Excelência em Ciências e Tecnologias Quânticas (Brasil, 2023c), com foco em criptografia e comunicações seguras.

Um exemplo é o projeto de desenvolvimento de sensores quânticos para detecção de submarinos, que envolve pesquisadores civis e engenheiros militares e será usado para aplicação em sistemas táticos incorporados a drones e navios da Marinha, incluindo submarinos, com tecnologia inteiramente nacional (Brasil, 2016).

Um dos projetos mais importantes realizados atualmente no IME é a primeira rede de criptografia quântica do país. A chamada Rede Rio Quântica é capaz de transmitir *bits* quânticos (qubits) por fibra óptica e laser a céu aberto. Um feixe de laser verde, visível sobre a Baía de Guanabara, conecta o Instituto de Física da UFF, em Niterói, ao CBPF, na Urca, como parte da Rio Quântica, a primeira rede experimental brasileira de comunicação baseada em mecânica quântica. Além dessa conexão aérea, a rede integra outras instituições, como a UFRJ, a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e o IME, por meio de fibra óptica. Desde 2021 em fase de testes, o projeto visa garantir segurança na transmissão de dados por meio de criptografia quântica (Lopes, 2024).

Outra iniciativa relevante de articulação entre os setores civil e militar no campo da inovação em defesa foi o Seminário de Tecnologias de Interesse da Defesa, realizado pela Secretaria de Produtos de Defesa (SEPROD) do Ministério da Defesa, nos dias 12 e 13 de maio de 2021. O evento reuniu representantes das Forças Armadas, da academia, da indústria e de centros de pesquisa para discutir os avanços em computação e comunicação quânticas. Durante a abertura, o então Comandante da Marinha, Almirante de Esquadra Almir Garnier dos Santos, destacou a

importância histórica das inovações tecnológicas na transformação das capacidades operacionais das Forças Armadas, reforçando a centralidade da ciência na estratégia de defesa (Brasil, 2025c).

Nesse evento, o então diretor do IEAv, Coronel Aviador Fabio Almeida, apresentou o estudo intitulado Sistema de Comunicação Seguro para o Setor Aeroespacial, voltado à análise das tecnologias de comunicação quântica já testadas ou em operação em plataformas orbitais e aeronaves. A pesquisa indicou que ao menos dez experimentos internacionais haviam sido realizados com sucesso, utilizando a troca de partículas atômicas para estabelecer comunicações seguras entre veículos tripulados, satélites e estações terrestres. Essa iniciativa reforça a capacidade institucional das Forças Armadas em acompanhar, analisar e eventualmente absorver tecnologias de ponta, contribuindo diretamente para a segurança das comunicações militares e abrindo espaço para parcerias com instituições civis no desenvolvimento de aplicações quânticas adaptadas ao contexto nacional (Brasil, 2025a).

Além dessas iniciativas, o Comando de Defesa Cibernética (ComDCiber) tem desempenhado papel relevante na articulação do ecossistema nacional de tecnologias quânticas, especialmente por meio da realização do Encontro Nacional de Tecnologias Quânticas para a Defesa. O evento reúne representantes das Forças Armadas, da academia, da indústria e de órgãos governamentais, com o objetivo de mapear competências, discutir aplicações estratégicas e fomentar a cooperação civil-militar. Nesse contexto, o ComDCiber atua como agente coordenador, promovendo a integração entre diferentes atores e direcionando o debate para temas críticos, como a segurança cibernética no domínio quântico e o desenvolvimento de comunicações seguras (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2023).

Apesar dos avanços, a CIMIC enfrenta importantes desafios, entre eles: i) falta de continuidade política e orçamentária: mudanças de governo frequentemente implicam reorientações em políticas de ciência e tecnologia, afetando a estabilidade dos projetos conjuntos; ii) barreiras culturais e institucionais: as diferentes culturas organizacionais de instituições civis e militares dificultam, por vezes, a comunicação e a gestão compartilhada de projetos; e iii) escassez de pessoal especializado em tecnologias quânticas, tanto no meio civil quanto no militar, o que exige políticas de formação e retenção de talentos (Rusinelli; Souza; Miano, 2024).

A política de defesa brasileira caracteriza-se pela descontinuidade entre ciclos de governo, o que compromete projetos de maturação longa como os quânticos (Silva; Souza, 2021). Sem mecanismos permanentes de financiamento e coordenação, a cooperação civil-militar tende a depender de iniciativas pontuais, fragilizando a acumulação de capacidades ao longo do tempo.

Superados esses desafios, a cooperação civil-militar oferece potencial para a construção de uma base tecnológica sólida, autóctone e competitiva no setor de defesa. A sinergia entre o conhecimento técnico-científico civil e a capacidade organizacional e logística das Forças Armadas permite acelerar o desenvolvimento de tecnologias críticas, como sensores quânticos, sistemas de criptografia quântica e redes de comunicação ultra seguras (Moura, 2024).

Em perspectiva comparada, os modelos dos Estados Unidos e da China se sustentam por continuidade de investimentos e coordenação estratégica de longo prazo (Parker *et al*., 2022; Julienne, 2024). Contudo, o Brasil ainda não dispõe dessas condições. A cooperação civil-militar representa, neste enquadramento, o principal caminho disponível para avançar no campo

quântico, compensando a ausência de um ecossistema privado robusto e de uma política nacional integrada para o setor.

O fortalecimento de uma relação entre o âmbito civil e militar para o desenvolvimento de pesquisa e avanço tecnológico em tecnologias quânticas requer esforços coordenados. Essa articulação demanda políticas públicas que incentivem a cooperação entre universidades, centros de pesquisa, indústrias e instituições de defesa, bem como investimentos contínuos em infraestrutura, capacitação de recursos humanos e transferência de conhecimento. A integração entre esses setores é essencial para consolidar um ambiente de inovação robusto, capaz de transformar descobertas científicas em aplicações estratégicas que ampliem o avanço das tecnologias quânticas no Brasil.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A COOPERAÇÃO CIVIL-MILITAR EM TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

O desenvolvimento de novas tecnologias disruptivas e adaptações para a doutrina brasileira requerem um alinhamento entre diversos órgãos e instituições que compõem a sociedade para seu devido funcionamento. A Teoria da Tríplice Hélice analisa o funcionamento da união entre universidade, governo e setor produtivo. A aplicação dessa teoria para a análise do funcionamento da tecnologia disruptiva é considerada como uma possibilidade, visto que a abordagem entende que a inovação em seu estado mais puro, não é mais um resultado exclusivo apenas de uma esfera institucional (Etzkowitz, 2017). Essa teoria afirma que, para se aplicar efetivamente uma inovação, é necessária uma interação colaborativa entre universidade, indústria e Estado, com diversos objetivos alinhados entre as partes, como destacado na Figura 1.

Figura 1 – Tríplice Hélice



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Etzkowitz (2017).

No que tange ao setor industrial, startups, *deep techs* e empresas consolidadas podem buscar parcerias com laboratórios universitários a fim de acelerar a inovação e internalizar capacidades quânticas. Essas colaborações são essenciais para reduzir o ciclo entre pesquisa fundamental e aplicação comercial, permitindo que o conhecimento gerado na academia seja rapidamente testado, adaptado e transformado em produtos ou serviços de alto valor agregado. Além disso, a interação com o ambiente universitário possibilita o acesso a talentos altamente qualificados, o uso compartilhado de infraestrutura científica de ponta e a participação em projetos cooperativos de P&D. Essa aproximação estratégica também favorece a criação de ecossistemas de inovação voltados à área quântica, nos quais o intercâmbio contínuo entre pesquisa, aplicação e mercado se torna um diferencial competitivo para o país (Costa; Souza; Castro, 2020).

A aplicação prática do modelo da Tríplice Hélice no contexto das tecnologias quânticas voltadas à defesa manifesta-se na articulação concreta entre universidades, instituições militares e o setor produtivo para viabilizar desde a pesquisa básica até a implementação de soluções estratégicas. No caso brasileiro, essa dinâmica pode ser observada na atuação do IME, que, em parceria com universidades como UFSCar, USP, UFPE e centros de pesquisa como o CNPEM, desenvolve projetos em comunicações e sensoriamento quântico alinhados às demandas da defesa nacional. Essas iniciativas são frequentemente apoiadas por programas governamentais de fomento, como o Pró-Defesa, evidenciando o papel do Estado como financiador e articulador (Brasil, 2024a).

Além disso, projetos como a Rede Hermes Quântica e os esforços para implementação de infraestruturas na região amazônica demonstram como essa cooperação se traduz em aplicações reais, envolvendo transferência de conhecimento, desenvolvimento tecnológico e testes em ambientes operacionais. Assim, a Tríplice Hélice deixa de ser apenas um modelo teórico e se concretiza como um arranjo institucional capaz de integrar competências científicas, capacidades operacionais e interesses estratégicos, promovendo inovação em áreas sensíveis e contribuindo para a soberania tecnológica nacional.

Nesse cenário, a Tríplice Hélice oferece um modelo adequado para entender e orientar a dinâmica de inovação em tecnologias quânticas. Consequentemente, a formação de consórcios interinstitucionais, redes de pesquisa aplicada e ambientes de inovação compartilhados são expressões concretas dessa articulação, cuja sinergia é indispensável para que o país alcance protagonismo na chamada segunda revolução quântica.

Na lógica da Tríplice Hélice, o papel da universidade é central e multifacetado, especialmente no contexto das tecnologias quânticas. Mais do que apenas produtora de conhecimento, essa instituição pública atua como agente ativo de inovação, promovendo interações estratégicas com o setor produtivo e o governo a fim de impulsionar o desenvolvimento científico e tecnológico do país. Ela é responsável pela geração de conhecimento fundamental em áreas como mecânica quântica, ciência dos materiais e teoria da informação, formando a base científica sobre a qual as inovações tecnológicas são construídas. Ademais, colabora na formação de recursos humanos altamente qualificados, preparando pesquisadores, engenheiros e técnicos capazes de atuar tanto na academia quanto na indústria, e de sustentar um ecossistema de inovação sólido e competitivo (Sabato; Botana, 1975).

A crescente aproximação entre universidade e setor produtivo tem resultado em pesquisas aplicadas, desenvolvimento de protótipos, transferência de tecnologia, geração de patentes

e criação de startups de base científica, especialmente no campo da computação e comunicação quântica. A instituição pública também contribui diretamente com o Estado, participando da formulação de políticas públicas, assessorando tecnicamente órgãos governamentais e liderando programas estratégicos, como centros de excelência e redes interinstitucionais.

Essas instituições colaboram para a internacionalização da ciência ao estabelecer parcerias globais e participar de redes multilaterais de pesquisa, garantindo que o país esteja conectado às fronteiras mais avançadas do conhecimento. Dessa forma, a universidade ocupa uma posição estratégica na tríade da inovação, sendo indispensável para o fortalecimento da soberania científica e da tecnológica nacional (Rothwell, 1994).

O setor produtivo exerce um papel importante na dinâmica da Tríplice Hélice – especialmente no avanço das tecnologias quânticas – ao transformar o conhecimento gerado pela universidade em soluções aplicáveis, escaláveis e economicamente viáveis. Empresas consolidadas, startups*, deep techs* e indústrias de alta tecnologia atuam como pontes entre a pesquisa e o mercado, investindo em desenvolvimento experimental, validação técnica, design de protótipos, manufatura avançada e comercialização.

Além disso, o setor produtivo contribui com investimentos financeiros diretos em P&D, seja por meio de centros internos de inovação, parcerias com universidades ou participação em programas públicos de incentivo. Este setor também exerce um papel importante na geração de empregos qualificados e na formação prática de profissionais, tanto por meio de estágios e residências tecnológicas quanto por programas de capacitação técnica (Schreiber, 2013).

No campo das tecnologias quânticas, a indústria é crucial para escalar protótipos desenvolvidos em ambiente acadêmico, para testá-los em ambientes reais e para conduzir as etapas necessárias à sua inserção no mercado, como certificação, padronização e industrialização. Empresas do setor produtivo também podem exercer papel de liderança em projetos cooperativos de inovação, organizando consórcios empresariais ou integrando redes com universidades e institutos públicos de pesquisa, a exemplo do IME. Ao absorver tecnologias emergentes e internalizar competências científicas e tecnológicas, o setor produtivo impulsiona a competitividade nacional e a autonomia tecnológica, atuando como um vetor estratégico para o sucesso da segunda revolução quântica (Agência Brasileira DE Desenvolvimento Industrial, 2025).

Considerando a Tríplice Hélice, o governo desempenha um papel estratégico e articulador no processo de inovação, especialmente, no desenvolvimento de tecnologias emergentes. Sua atuação é fundamental para criar as condições institucionais, econômicas e regulatórias que permitam a cooperação eficaz entre universidades e setor produtivo (Etzkowitz, 2017). O governo atua, em primeiro lugar, como formulador de políticas públicas e estratégias nacionais, capazes de orientar o desenvolvimento científico-tecnológico de longo prazo. A criação de programas como planos nacionais de computação e comunicação quântica é um exemplo claro disso, pois auxilia a reduzir incertezas tecnológicas, direcionar investimentos e estabelecer prioridades estratégicas para o país (Dorff; Meyer, 2006).

Além disso, o Estado exerce a função de financiar o risco, apoiando projetos de pesquisa e desenvolvimento por meio de agências de fomento, subsídios, créditos especiais, bolsas e incentivos fiscais. Esse apoio é particularmente importante em áreas de fronteira como a quântica, na qual os custos são elevados, os retornos incertos e o investimento privado limitado (Rodrigues;

Libero, 2024). Outro papel relevante é o de regulador e facilitador, que envolve a criação de marcos legais e ambientes regulatórios que favoreçam a inovação, a proteção da propriedade intelectual, a transferência de tecnologia e a segurança jurídica das parcerias público-privadas.

O governo também pode atuar como demandante qualificado, especialmente por meio de compras públicas para inovação em setores como defesa, saúde, telecomunicações e segurança cibernética, o que contribui para a validação e a escalabilidade de novas tecnologias. Esses investimentos ficam claros em situações como o plano do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) para tecnologias quânticas de desenvolver um Laboratório de Tecnologias Quânticas do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). O objetivo do projeto é criar um espaço para desenvolver a tecnologia de fabricação, caracterização e operacionalização de *bits* quânticos e outros dispositivos supercondutores (Brasil, 2025b).

Exemplos como esse demonstram o papel do governo na formação de capital humano ao apoiar programas educacionais, fomentar pós-graduações interdisciplinares, promover intercâmbios internacionais e garantir acesso à infraestrutura científica de ponta. Dessa forma, sua atuação integrada com universidades e empresas é indispensável para posicionar o país de forma soberana e competitiva na corrida global pela liderança no campo das tecnologias quânticas. Nesse contexto, supõe-se que a articulação da tríplice deve ser não apenas estimulada, mas estruturada de forma estratégica e contínua, a fim de consolidar um ecossistema nacional de inovação em tecnologias quânticas (Brasil, 2023b)

A criação de políticas públicas que incentivem investimentos em pesquisa de fronteira, bem como a oferta de mecanismos de financiamento específicos para startups de base quântica, é uma medida fundamental para transformar o conhecimento científico em aplicações economicamente viáveis fornecidas pelo governo. Além disso, a presença ativa do Estado como regulador, financiador e, em muitos casos, como primeiro demandante – especialmente nas áreas de defesa, telecomunicações e segurança da informação –, pode reduzir incertezas tecnológicas e atrair capital privado para projetos de alto risco (Brasil, 2024b).

A capacitação de recursos humanos, por sua vez, deve ser tratada como prioridade nacional, por meio de programas de pós-graduação interdisciplinares, intercâmbios internacionais e fomento a iniciativas educacionais voltadas à formação em ciência e engenharia quântica.

A consolidação de uma base científica sólida, aliada à capacidade de aplicação tecnológica e ao respaldo institucional do Estado, é o que permitirá ao Brasil não apenas acompanhar, mas também influenciar os rumos da inovação quântica em escala global. Assim, a Tríplice Hélice não é apenas uma teoria explicativa, mas um guia prático para a formulação de estratégias de desenvolvimento tecnológico que integrem competências e fortaleçam a soberania científica e econômica do país.

As tecnologias quânticas derivam principalmente da chamada segunda revolução quântica, marcada pelo controle e manipulação precisa de sistemas quânticos individuais, como átomos, íons, fótons e quasipartículas. Diferentemente da primeira revolução, que gerou tecnologias hoje amplamente difundidas (como semicondutores, lasers e energia nuclear), a nova revolução proporciona saltos disruptivos. Em outros termos, são mudanças tecnológicas que produzem rupturas significativas nas capacidades existentes, alterando padrões operacionais, estratégicos e tecnológicos, ao introduzirem novos paradigmas que substituem ou superam tecnologias anteriores,

especialmente em áreas consideradas críticas para a defesa (Girardi; França Junior; Galdino, 2024). Essas reformulações afetam diretamente o sensoriamento, a comunicação segura, a navegação e a computação de alto desempenho (LevelQuantum, 2023).

Embora ainda em estágios iniciais de níveis de Maturidade Tecnológica (TRLs), essas tecnologias são amplamente reconhecidas como de uso dual: aplicações civis e militares se sobrepõem consideravelmente, gerando demandas urgentes por estratégias de cooperação entre os dois setores (LevelQuantum, 2023).

A parceria entre civis e militares para o desenvolvimento de novas tecnologias disruptivas pode proporcionar uma diminuição do acesso privilegiado no cenário internacional. O IME conta com o dispositivo emissor de fótons únicos a partir de comunicação quântica, o qual tem por objetivo fornecer bases para sistemas de comunicação quântica ultra-seguros, fortalecendo a BID e reduzindo a dependência externa. A parceria civil-militar se delimita a partir de uma cooperação entre o IME, a UFSCar e o CNPEM, com apoio da UFSCar (nanoestruturas) e do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (Brasil, 2024a).

O desenvolvimento do emissor de fótons únicos pelo IME está diretamente relacionado às iniciativas nacionais em comunicação quântica, como a RRQ. Esse tipo de dispositivo constitui um dos componentes fundamentais para a implementação de protocolos de QKD, ao possibilitar a geração controlada de estados quânticos de luz. Nesse sentido, ainda que em estágio experimental, tais desenvolvimentos contribuem para a validação e o aprimoramento das infraestruturas de comunicação segura baseadas em princípios da mecânica quântica no Brasil (Brasil, 2024a).

As instituições envolvidas proporcionaram projetos como o emissor de fótons, que foi um dos primeiros programas do IME voltado para tecnologias quânticas; seu objetivo foi desenvolver uma prova de conceito de rede metropolitana baseada em comunicações quânticas. A colaboração civil-militar no projeto é essencial, pois integra o conhecimento técnico das universidades e centros de pesquisa com as demandas operacionais das Forças Armadas, seguindo modelos adotados internacionalmente, como o programa Organização do Tratado do Atlântico Norte (Otan/Nato, 2022), que acelera soluções quânticas *dual-use* em parceria com startups. No contexto nacional, a implantação dos planos de desenvolvimento do MCTI e pesquisadores civis mostra que essa sinergia acelera tanto o desenvolvimento quanto a validação tecnológica em ambientes reais de defesa (Carneiro, 2024).

Além disso, o IME conta com o Programa Quantum, que visa a criação e implantação do Centro de Desenvolvimento de Tecnologias Quânticas do Exército Brasileiro; o projeto Pró-Presquisa do Departamento de Operações de Comércio Exterior D(DECEx), intitulado "Estudo do impacto da Inteligência Artificial e das Tecnologias Quânticas no Preparo e Emprego da Força Terrestre"; e o Programa Pró-Defesa (CAPES), intitulado "Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas: construindo e integrando agendas e redes de pesquisa em tecnologias disruptivas para aprimorar e ampliar a Segurança e a Defesa Nacional", em colaboração com outras 42 instituições (Rodrigues; Libero, 2024).

Outras instituições, como a ECEME, também realizam diversas atividades que abrangem o âmbito civil-militar para desenvolver pensamento crítico sobre a área de tecnologias quânticas. O programa de pós-graduação *stricto sensu* contempla mestrado acadêmico, doutorado e pós-doutorado, com linhas de pesquisa voltadas para estudos estratégicos e defesa. Enquanto o

IME atua com aspectos técnicos da tecnologia quântica, a ECEME trata do "por que, quando e onde empregar" essas tecnologias, o que é vital para orientar investimentos, doutrina e parcerias. A formação de pensadores estratégicos com compreensão tecnológica é uma das metas da instituição (Rodrigues; Libero, 2024).

A integração das instituições militares permite alinhar em conjunto com instituições civis os interesses estratégicos da defesa nacional às capacidades científicas do país, favorecendo o desenvolvimento de soluções tecnológicas de uso dual. O compartilhamento de infraestrutura laboratorial, a troca de conhecimento técnico-científico e a formação de quadros especializados garantem maior eficiência na implementação de projetos sensíveis, como as redes de comunicação quântica. Ao institucionalizar essa colaboração, o Brasil avança no sentido de construir autonomia tecnológica, preparar-se para cenários futuros de ameaças cibernéticas e consolidar sua soberania digital em áreas críticas de segurança (LevelQuantum, 2023).

A ECEME tem incorporado o Ciclo de Estudos Estratégicos (CEE) como uma iniciativa essencial para o aprofundamento do pensamento militar voltado às transformações tecnológicas contemporâneas (Brasil, 2025e). Na série de cursos e seminários do CEE, temas como computação quântica, sensores quânticos e comunicações seguras são discutidos não apenas como tópicos de interesse científico, mas como elementos centrais para a modernização da doutrina militar brasileira. O evento é estruturado em encontros temáticos, que reúnem oficiais-alunos, pesquisadores civis, acadêmicos e representantes de instituições estratégicas, como o Ministério da Defesa, o MCTI, o IME e o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Cenispam) (Brasil, 2025b).

Essa abordagem multidisciplinar permite a análise integrada de tendências tecnológicas e seus impactos nas capacidades operacionais das Forças Armadas. Os estudos são voltados para médio e longo prazo, considerando as tecnologias emergentes no contexto da guerra híbrida (Fernandes, 2016), da transformação digital da defesa e da necessidade de soberania nacional em áreas sensíveis. Além disso, o CEE pode contribuir diretamente para a formação de lideranças militares com capacidade de compreender e aplicar os conceitos derivados de ciência e tecnologia de ponta, articulando-os com as necessidades estratégicas do país. Assim, a ECEME reforça seu papel como centro de excelência no pensamento estratégico nacional, promovendo uma doutrina moderna, adaptada aos desafios do século XXI (Brasil, 2023a).

5 CONCLUSÃO

A pesquisa indica que as tecnologias quânticas são um fator crítico de soberania nacional e projeção de poder no século XXI. A análise revelou que as instituições militares brasileiras desempenham um papel importante como catalisadoras da cooperação civil-militar, atuando simultaneamente como demandantes, articuladoras e desenvolvedoras de capacidades tecnológicas quânticas.

O estudo indicou que o IME é um centro de excelência técnica, desenvolvendo projetos pioneiros como o emissor de fótons únicos e a Rede Hermes Quântica, além de estabelecer parcerias estratégicas com universidades civis e centros de pesquisa. Paralelamente, a ECEME consolida-se como núcleo de pensamento estratégico, integrando as implicações das tecnologias quânticas à doutrina militar brasileira por meio de programas formativos e ciclos de estudos especializados.

A aplicação do modelo da Tríplice Hélice auxilia a compreensão da dinâmica de inovação em tecnologias quânticas no Brasil. A sinergia entre universidades (produção de conhecimento fundamental), setor produtivo (aplicação e escalabilidade) e governo (políticas públicas e financiamento) mostrou-se necessária para acelerar o desenvolvimento de capacidades nacionais em um contexto de competição tecnológica internacional acirrada.

No cenário geopolítico, a comparação entre as estratégias dos Estados Unidos e da China revelou modelos distintos, mas convergentes em seus objetivos relacionados ao desenvolvimento de tecnologias quânticas. Enquanto os EUA apostam em um ecossistema diversificado de inovação público-privada, a China adota uma abordagem centralizada com investimentos estatais massivos. Ambas as estratégias reconhecem que o domínio quântico transcende o avanço científico, constituindo-se como componente decisivo da arquitetura internacional contemporânea.

Para o Brasil, os achados indicam que as iniciativas ainda embrionárias em tecnologias quânticas, embora promissoras, exigem maior articulação institucional, continuidade de investimentos e visão estratégica de longo prazo. O projeto IATQ, a Rede Rio Quântica, as iniciativas do ComDCiber (Centro Brasileiro De Pesquisas Físicas, 2023) e a Rede Hermes representam marcos importantes, mas sua consolidação depende do fortalecimento da cooperação civil-militar através de políticas públicas estruturantes.

A pesquisa identificou desafios que demandam atenção prioritária: 1) a necessidade de continuidade política e orçamentária para projetos de longo prazo; 2) a superação de barreiras culturais e institucionais entre os setores civil e militar; e 3) o desenvolvimento de infraestrutura científica adequada às demandas tecnológicas emergentes.

Como recomendações, sugere-se: a institucionalização de mecanismos permanentes de diálogo civil-militar; a criação de centros de excelência multidisciplinares em tecnologias quânticas; o estabelecimento de programas de formação especializada em parceria com universidades; a implementação de políticas de compras públicas para inovação que favoreçam o desenvolvimento da Base Industrial de Defesa (BID) nacional; e a elaboração de uma estratégia nacional abrangente para tecnologias quânticas que integre defesa, economia e ciência.

A cooperação civil-militar contribui para a construção da soberania tecnológica brasileira. A capacidade de articular conhecimento científico civil com capacidades organizacionais militares determinará a posição do Brasil na hierarquia global de poder na era quântica. Desse modo, as instituições militares brasileiras, ao atuarem como vetores de integração e inovação, consolidam-se no desenvolvimento de um ambiente nacional de defesa tecnologicamente autônomo e competitivo.

A corrida quântica, já em curso, solicita ao Estado brasileiro uma postura proativa, coordenada e visionária, capaz de transformar o potencial científico nacional em capacidades estratégicas efetivas. O sucesso desse processo dependerá da consolidação da cooperação civil-militar como política de Estado, garantindo que o país influencie ativamente os rumos da revolução quântica global.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Ministério da Defesa (através do Programa PRÓ-DEFESA V - Rede IATQ, processo

88887.961681/2024-00), e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (através dos projetos PDI-D-QBRN/1545-22, CMLabIME/0160-22 e QUANTUM II/3310-24) pelo financiamento recebido.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. *et al*. Quality in qualitative organizational research: types of triangulation as a methodological alternative. **Administração: ensino e pesquisa**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 1, p. 66-98, 2018.

ABELÉM, A. A revolução das tecnologias quânticas: caminhos para o desenvolvimento nacional. **Computação Brasil**, n. 55, p. 23-27, 2026.

AZEVEDO, C. E. F. *et al*. A estratégia de triangulação: objetivos, possibilidades, limitações e proximidades com o pragmatismo. **Encontro de Ensino e Pesquisa em Administração e Contabilidade**, v. 4, p. 13-31, 2013.

BRASIL. Decreto nº 6.703, de 18 de dezembro de 2008. Aprova a Estratégia Nacional de Defesa, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 19 dez. 2008.

BRASIL. Agência Brasileira de Cooperação (ABC); INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (Ipea). **Cooperação Brasileira para o Desenvolvimento Internacional (Cobradi): 2011 2013**. Brasília: ABC; Ipea, 2016. Disponível em: https://www.gov.br/abc/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos/COBRADI_20112013.pdf. Acesso em: 30 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Livro Branco da Defesa Nacional**. Brasília, 2020.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Marinha promove seminário sobre inovações disruptivas**. Agência Marinha de Notícias, 5 dez. 2023a. Disponível em: https://www.agencia.marinha.mil.br/ciencia-e-tecnologia/marinha-promove-seminario-sobre-inovacoes-disruptivas. Acesso em: 17 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Observatório Nacional. **Comitiva da Marinha do Brasil visita Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do ON**, 26 jul. 2023b. Disponível em: https://www.gov.br/observatorio/pt-br/assuntos/noticias/comitiva-da-marinha-do-brasil-visita-laboratorio-de-desenvolvimento-de-sensores-magneticos-do-on . Acesso em: 19 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Escola de Comando e Estado-Maior do Exército. **25º Ciclo de Estudos Estratégicos aborda tecnologias disruptivas e segurança internacional**. Rio de Janeiro, 9 nov. 2023c. Disponível em: https://www.eceme.eb.mil.br/noticias-eceme-m-pt/1945-cee-25-1. Acesso em: 17 jun. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações. **Tecnologias quânticas, telecomunicações e TICs:** uma nova frente para o posicionamento internacional do Brasil. Anatel, 2 jul. 2024a. Disponível em: https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/tecnologias-quanticas-telecomunicacoes-e-tics-uma-nova-frente-para-o-posicionamento-internacional-do-brasil. Acesso em: 18 jun. 2025.

BRASIL. Exército Brasileiro. **Exército Brasileiro contribui com a chegada de fibra óptica na Ilha do Marajó**. 25 mar. 2024b. Disponível em: https://www.eb.mil.br/web/noticias/w/exercito-brasileiro-contribui-com-a-chegada-de-fibra-optica-na-ilha-do-marajo. Acesso em: 22 mar. 2026.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. **IME desenvolve dispositivo emissor de fótons únicos**. Rio de Janeiro, 4 ago. 2024c. Disponível em: https://www.eb.mil.br/web/noticias/w/ime-desenvolve-dispositivo-emissor-de-fotons-unicos. Acesso em: 17 jun. 2025.

BRASIL. Força Aérea Brasileira. Instituto de Estudos Avançados. **IEAv participa de Seminário do Ministério da Defesa sobre tecnologias quânticas**. 2025a. Disponível em: https://ieav.dcta.mil.br/index.php/slideshow/344-ieav-participa-de-seminario-do-ministerio-da-defesa-sobre-tecnologias-quanticas. Acesso em: 19 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Brasil avança na corrida das tecnologias quânticas**. Portal Gov.br, 9 jan. 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/01/brasil-avanca-na-corrida-das-tecnologias-quanticas. Acesso em: 18 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Seminário da Defesa avalia os desafios e avanços da logística militar durante a LAAD**. Portal Defesa Civil, 2025c. Disponível em: https://www.gov.br/defesa-civil/pt-br/centrais-de-conteudo/noticias/seminario-da-defesa-avalia-os-desafios-e-avancos-da-logistica-militar-durante-a-laad. Acesso em: 30 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. **IME ativa canal quântico pioneiro e avança rumo à Internet Quântica no Brasil.** 12 nov. 2025d. Disponível em: https://www.ime.eb.mil.br/home/noticias/ime-internet-quantica-no-brasil. Acesso em: 22 jan. 2026.

BRASIL. **XXXI Ciclo de Estudos Estratégicos da ECEME**: IA e tecnologias quânticas – tendências e desafios para a defesa. Rio de Janeiro, 2025e. Disponível em: https://adesg.org.br/xxxi-ciclo-de-estudos-estrategicos-da-eceme/. Acesso em: 18 jun. 2025.

BRITO, D. D.; FERREIRA, R.; CHAVES, A. J. Perspectivas globais militares sobre tecnologias quânticas. **Spectrum**, v. 24, n. 1, p. 54-60, 2023.

CALDEIRA, A.. Feynman, dissipação e computação quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, p. 1-9, 2018.

CARNEIRO, V. G. A. **Os impactos das comunicações quânticas sobre a segurança e a defesa cibernética**. 2024. 176 f. Monografia (Especialização em Segurança e Defesa Cibernética) – Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2024.

CARSON, C. The origins of the quantum theory. **Beam Line**, v. 30, n. 2, p. 6-19, 2000.

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS (CBPF). **CBPF participa de I Encontro Nacional de Tecnologias Quânticas para a Defesa**. Rio de Janeiro, 11 out. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cbpf/pt-br/assuntos/noticias/cbpf-participa-de-i-encontro-nacional-de-tecnologias-quanticas-para-a-defesa. Acesso em: 19 mar. 2026.

CHIBENI, S. Implicações filosóficas da microfísica. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 2, n. 2, p. 141-164, 1992.

COSTA, A. A.; SOUZA, T. A.; CASTRO, C. C. Desafios e críticas ao modelo de Hélice Tríplice: uma revisão integrativa. **Desenvolvimento em Questão**, v. 18, n. 52, p. 233-248, 2020.

COSTA, G.; AZEVEDO, C.; MOREIRA, F. 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.

DIRAC, P. A. M. **The quantum theory of the electron. Proceedings of the Royal Society**. A, v. 117, n. 778, p. 610–624, 1928.

ETZKOWITZ, H.; ZHOU, C. Hélice Tríplice: inovação e empreendedorismo universidade-indústria-governo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 31, n. 90, p. 23-48, 2017.

ESTADOS UNIDOS. National Quantum Coordination Office. **National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2022 Budget**. Washington, DC: Quantum.gov, 2021. Disponível em: Quantum.gov – NQI Annual Report FY2022.

FERNANDES, H. M. M. As novas guerras: o desafio da guerra híbrida. Revista em Ciências Militares, v. 4, n. 2, p. 13-40, 2016.

GIL, A. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GIRARDI, R.; FRANÇA JUNIOR, J.; GALDINO, J. Criticidade tecnológica na área de defesa em países em desenvolvimento: conceitos e critérios. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 4, e3618, 2024.

GODOY, A. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

HEISENBERG, W. **Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen**. Zeitschrift für Physik, v. 33, p. 879–893, 1925.

HING, T. **A cooperação civil–militar e os assuntos civis na doutrina militar nacional**. Lisboa: Instituto de Estudos Superiores Militares, 2010.

INTONTI, K. *et al*. A Segunda Revolução Quântica: fatos inexplorados e últimas notícias. **Enciclopédia**, v. 4, n. 2, p. 630-671, 2024.

JAMMER, M. **The conceptual development of quantum mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1966.

JULIENNE, M. **China's quest for a quantum leap**. Paris: Institut français des relations internationales, 2024.

KRAGH, H. **Quantum generations: a history of physics in the twentieth century**. Princeton: Princeton University Press, 1999.

KRELINA, M. Quantum technology for military applications. **EPJ Quantum Technology**, v. 8, n. 1, p. 24, 2021.

KRELINA, M. The prospect of quantum technologies in space for defence and security. **Space Policy**, v. 65, n. 1, p. 1-7, 2023.

LEVELQUANTUM. **LevelQuantum selezionato per il programma DIANA della NATO**. Milano: levelQuantum, 30 nov. 2023. Disponível em: https://www.levelquantum.eu/levelquantum-selezionato-per-il-programma-dianan-della-nato/. Acesso em: 17 jun. 2025.

LEYDESDORFF, L.; MEYER, M. Triple Helix indicators of knowledge-based innovation systems. **Research Policy**, v. 35, n. 10, p. 1441-1449, 2006.

LONGO, W. P.; MOREIRA, W. S. Tecnologia e inovação no setor de defesa: uma perspectiva sistêmica. **Revista da Escola de Guerra Naval**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p. 277-304, 2013.

LOPES, R. J. Primeira rede de criptografia quântica do país deve unir cinco instituições de pesquisa. **Revista Pesquisa FAPESP**, 2024. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/primeira-rede-de-criptografia-quantica-do-pais-deve-unir-cinco-instituicoes-de-pesquisa/. Acesso em: 21 jun. 2025.

MELLO, A. **Introdução a interoperabilidade**. Brasília: ENAP, 2015.

MOURA, J. A. A interação militar-civil na indústria de defesa. In: ROCHA, M; ALVES, V. C.; FIGUEIREDO, E. de L. (org.). **Anais do X EBERI**: Segurança Internacional e Defesa Nacional: reflexões a partir de um sistema internacional em transição. Niterói: Editora Luzes, 2024. p. 20-36.

MOREIRA, F.; CARNEIRO, V.; GALDINO, J. Tecnologias quânticas: uma questão de soberania nacional. **Revista da EGN**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, p. 643-686, 2025.

NEUMANN, N. M. P.; VAN HEESCH, M. P. P.; DE GRAAF, P. **Quantum communication for military applications**. The Hague: TNO, 2023.

OLIVEIRA, T.; AZEVEDO, C.; MOREIRA, F. O papel das tecnologias quânticas na disputa geopolítica entre grandes potências e seu impacto na defesa do Brasil. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, v. 22, n. 65, p. 268-296, 2025.

OMAAR, H; MAKARYAN, M. **How innovative is China in quantum?**. Washington, D.C.: Information Technology and Innovation Foundation (ITIF), set. 2024. Disponível em: https://itif.org/publications/2024/09/09/how-innovative-is-china-in-quantum/. Acesso em: 17 jun. 2025.

OTAN. **NATO Advisory Group on Emerging and Disruptive Technologies – Annual Report 2021**. Bruxelas, 2022. Disponível em: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2022/7/pdf/220715-EDT-adv-grp-annual-report-2021.pdf. Acesso em: 17 jun. 2025.

PARKER, E. **The Chinese industrial base and military deployment of quantum technology**. Santa Monica: Rand Corporation, 2024.

PARKER, E. *et al*. **As assessment of the U.S. and Chinese industrial bases in quantum technology**. Santa Monica: Rand Corporation, 2022.RIGOLIN, G.; RIEZNIK, A. Introdução a computação quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 4, p. 517-526, 2005.

RODRIGUES, B.; LIBERO, E. **Desenvolvimento de banco de dados teórico de espectros de massas de compostos análogos a agentes neurotóxicos da série A**. 2024. TCC (Graduação em Engenharia Química) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2024.

ROTHWELL, R. Towards the fifth-generation innovation process. **International Marketing Review**, v. 11, n. 1, p. 7-31, 1994.

RUSINELLI, B.; SOUZA, M.; MIANO, M. A computação quântica e o desafio da capacitação tecnológica. **Revista Tecnológica da Fatec de Americana**, v. 12, n. 1, 2025.

SABATO, J. A.; BOTANA, N. La ciencia y la tecnología en el desarrollo futuro de América Latina. In: SABATO, J. A. **El pensamiento latinoamericano en la problemática ciencia-tecnología-desarrollo-dependencia**. Buenos Aires: Paidos, 1975. p. 132-143.

SCHMIDT, E. Innovation power: why technology will define the future of geopolitics. **Foreign Affairs**, v. 102, n. 2, p. 38-52, 2023.

SCHREIBER, D. *et al*. Posicionamento estratégico de MPE's com base na inovação através do modelo Hélice Tríplice. **Revista Eletrônica de Administração**, Porto Alegre, v. 19, p. 767-795, 2013.

SCHRÖDINGER, E. **Quantisierung als Eigenwertproblem**. Annalen der Physik, v. 384, n. 4, p. 361–376, 1926.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **IA e computação quântica: Palco Sebrae discute o presente e o futuro**. Brasília, 11 out. 2025. Disponível em: ABDI – IA e computação quântica: Palco Sebrae discute o presente e o futuro. Acesso em: 08 nov. 2025.

SILVA, P. L.; SOUZA, H. V. Indústria de defesa e desenvolvimento: o papel das forças armadas como indutoras de inovação tecnológica. **Economia e Sociedade,** Campinas, v. 30, n. 1, p. 207-231, 2021.

SMITH III, F. L. Quantum technology hype and national security. **Security dialogue**, v. 51, n. 5, p. 499-516, 2020.

SRI INTERNATIONAL. **New data on the growing quantum industry**. [*s. l.*], 2024. Disponível em: https://www.sri.com/press/story/new-data-on-the-growing-quantum-industry/. Acesso em: 21 jun. 2025.