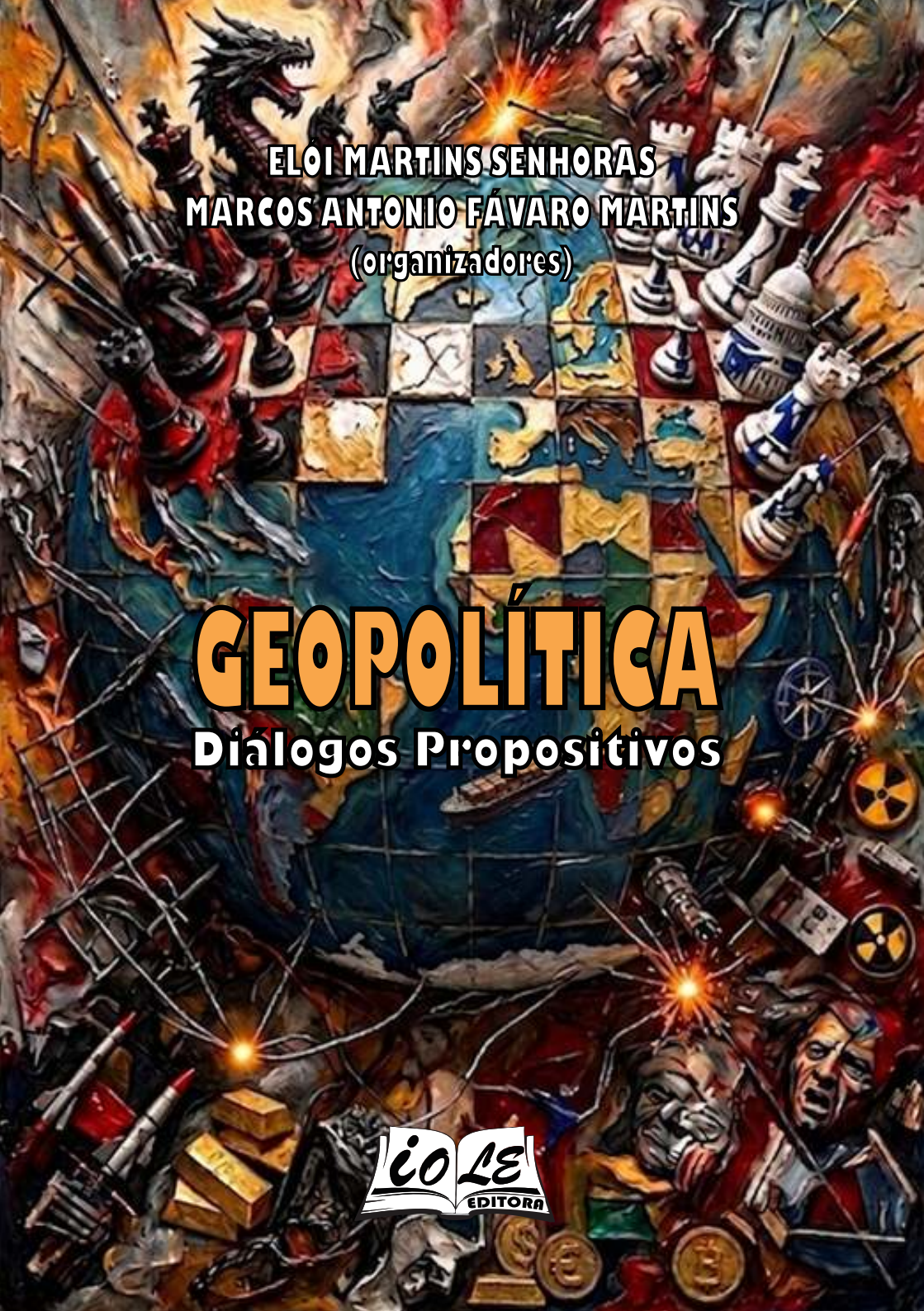
ELOI MARTINS SENHORAS
MARCOS ANTONIO FÁVARO MARTINS
(organizadores)

GEOPOLÍTICA

Diálogos Propositivos



EDITORA

GEOPOLÍTICA

Diálogos Propositivos

GEOPOLÍTICA

Diálogos Propositivos

ELÓI MARTINS SENHORAS
MARCOS ANTONIO FÁVARO MARTINS
(organizadores)

BOA VISTA/RR
2026

Editora IOLE

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei n. 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.



EXPEDIENTE

Revisão
Elói Martins Senhoras
Geane Ribeiro Silva Monteiro

Capa
Alokike Gael Chloe Hounkonnou
Elói Martins Senhoras

Projeto Gráfico e Diagramação
Elói Martins Senhoras
Balbina Líbia de Souza Santos

Conselho Editorial
Abigail Pascoal dos Santos
Charles Pennaforte
Claudete de Castro Silva Vitte
Elói Martins Senhoras
Fabiano de Araújo Moreira
Julio Burdman
Marcos Antônio Fávaro Martins
Rozane Pereira Ignácio
Patrícia Nasser de Carvalho
Simone Rodrigues Batista Mendes
Vitor Stuart Gabriel de Pieri

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO (CIP)

Se72 SENHORAS, Elói Martins; MARTINS, Marcos Antonio Fávaro (organizadores).

Geopolítica: Diálogos Propositivos. Boa Vista: Editora IOLE, 2026.

Série: Geografia. Editor: Elói Martins Senhoras.

ISBN: 978-65-979656-8-7

1 - Estudos de Caso. 2 - Geografia. 3 - Geopolítica. 4 - Teoria.
I - Título. II - Senhoras, Elói Martins. III - Geografia. IV - Série

CDD–900

A exatidão das informações, conceitos e opiniões é de exclusiva responsabilidade dos autores.
O presente livro contou com avaliação às cegas no sistema double-blind-review.



EDITORIAL

A editora IOLE tem o objetivo de divulgar a produção de trabalhos intelectuais que tenham qualidade e relevância social, científica ou didática em distintas áreas do conhecimento e direcionadas para um amplo público de leitores com diferentes interesses.

As publicações da editora IOLE têm o intuito de trazer contribuições para o avanço da reflexão e das práxis em diferentes áreas do pensamento e para a consolidação de uma comunidade de autores comprometida com a pluralidade do pensamento e com uma crescente institucionalização dos debates.

O conteúdo produzido e divulgado neste livro é de inteira responsabilidade dos autores em termos de forma, correção e confiabilidade, não representando discurso oficial da editora IOLE, a qual é responsável exclusivamente pela editoração, publicação e divulgação da obra.

Concebido para ser um material com alta capilarização para seu potencial público leitor, o presente livro da editora IOLE é publicado nos formatos impresso e eletrônico a fim de propiciar a democratização do conhecimento por meio do livre acesso e divulgação das obras.

Prof. Dr. Elói Martins Senhoras

(Editor Chefe)

Copyright © Editora IOLE
2026

CAPÍTULO 4

Tecnologia Quântica e Defesa Nacional:
Oportunidades e Desafios para o Brasil

TECNOLOGIA QUÂNTICA E DEFESA NACIONAL: OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA O BRASIL[1]

Gabriela Alves de Borba Costa[2]
Carlos Eduardo Franco Azevedo[3]
Fernando Manuel Araújo Moreira[4]

As Tecnologias Quânticas emergem como um dos campos mais disruptivos da ciência contemporânea, com potencial para transformar profundamente setores estratégicos como comunicação, computação, criptografia e metrologia. No contexto global, essas tecnologias têm sido vistas como uma nova fronteira de poder científico e econômico, com implicações diretas para a soberania e a segurança nacional. Países como Estados Unidos, China e membros da União Europeia têm investido massivamente em programas de pesquisa e desenvolvimento em Tecnologias Quânticas, reconhecendo seu impacto potencial na defesa, na economia e na geopolítica.

No Brasil, o desenvolvimento de Tecnologias Quânticas ainda está em estágio inicial, mas apresenta sinais de crescimento. O país conta com grupos de pesquisa qualificados e uma base científica

[1] A pesquisa apresentada neste capítulo contou com o apoio institucional da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), do Ministério da Defesa (Programa Pró-Defesa V) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Uma versão prévia deste texto foi publicada no periódico Boletim de Conjuntura (BOCA), ano VII, vol. 23, n. 67, Boa Vista, 2025.

[2] Professora da Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME). Doutora em Ciências Militares pela ECEME. E-mail para contato: gabrielaborba@ppgcm.eceme.eb.mil.br

[3] Professor da Escola de Comando e Estado-Maior do Exército (ECEME). Doutor em Administração pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). E-mail para contato: francoazevedo@francoazevedo.com.br

[4] Professor do Instituto Militar de Engenharia (IME). Doutor em Física pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). E-mail para contato: fernando.manuel@ime.eb.br

consolidada em áreas como física, computação e engenharia, que têm contribuído para avanços no campo quântico. Contudo, a articulação entre esses grupos e o setor de defesa ainda é limitada, o que representa uma lacuna estratégica em um cenário global cada vez mais competitivo. Essa lacuna justifica a necessidade de estudos que explorem o potencial de integração entre a produção científica nacional e as demandas estratégicas de defesa, especialmente em um momento em que ameaças cibernéticas e desafios à segurança nacional se tornam mais complexos e sofisticados.

Diante desse contexto, este estudo busca responder à seguinte questão: como se articulam os grupos de pesquisa e instituições brasileiras que atuam em Tecnologias Quânticas com o setor de defesa, considerando seus potenciais contribuições para a soberania nacional? Essa pergunta reflete a necessidade de compreender o papel das Tecnologias Quânticas na construção de capacidades autônomas de segurança e defesa, alinhadas aos interesses estratégicos do Brasil.

O objetivo geral deste estudo é mapear os grupos de pesquisa brasileiros que desenvolvem estudos em Tecnologias Quânticas, e analisar suas possíveis interações com o setor de defesa nacional, considerando o potencial de transbordamento científico-tecnológico, com vistas ao fortalecimento da soberania nacional. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

a. Mapear o universo nacional de grupos de pesquisas relacionados a temática quântica, com base no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq;

b. Identificar, neste universo, os grupos específicos focados em Tecnologias Quânticas com potencial de transbordamento com o setor de defesa, considerando o desenvolvimento de linhas de pesquisa aderentes a defesa, áreas de atuação (taxonomias) e a presença de

parcerias com instituições militares, centros tecnológicos das Forças Armadas ou empresas estratégicas do setor;

c. Analisar em profundidade os grupos selecionados, com foco em sua distribuição regional, ano de criação, concentração institucional, natureza das instituições, articulações e temáticas de pesquisa.

Esta proposta busca contribuir para os esforços acadêmicos recentes voltados à investigação do papel das Tecnologias Quânticas na defesa nacional. Estudos, neste campo, têm explorado diferentes aspectos da temática, como os impactos das comunicações quânticas na segurança cibernética, as aplicações do sensoriamento remoto quântico para estratégias de defesa, as implicações estratégicas do conceito de guerra quântica e o potencial da computação quântica para transformar as capacidades operacionais das Forças Armadas brasileiras. Além disso, há uma crescente atenção para o desenvolvimento de ecossistemas tecnológicos e a gestão de equipes em projetos voltados à implementação de tecnologias quânticas no setor de defesa.

Metodologicamente, esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa, de natureza exploratória, voltada à compreensão das interações entre a produção científica em Tecnologias Quânticas no Brasil e o setor de defesa. O estudo fundamenta-se no mapeamento dos grupos de pesquisa cadastrados no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq, por meio da aplicação de filtros específicos relacionados ao tema. A coleta de dados incluiu a análise de nomes dos grupos, linhas de pesquisa e palavras-chave, abrangendo todas as áreas do conhecimento e tipos institucionais, sem restrições iniciais quanto ao setor de aplicação. A análise foi conduzida com base na técnica de Análise de Conteúdo, permitindo uma categorização em dois níveis analíticos: (i) identificação dos grupos

atuantes em pesquisa quântica no Brasil, considerando abordagens teóricas, experimentais e filosóficas; (ii) categorização daqueles cuja atuação envolve diretamente Tecnologias Quânticas com potencial de transbordamento para o setor de defesa nacional. Para garantir maior confiabilidade, essas etapas foram conduzidas de forma independente por especialistas, com base em critérios previamente definidos. A metodologia adotada possibilitou identificar os atores mais relevantes, analisar seus vínculos institucionais, redes de parcerias, distribuição regional, ano de criação e temáticas abordadas.

Para alcançar esse objetivo, o artigo está organizado em cinco seções. Após esta introdução, a segunda seção apresenta o referencial teórico, abordando os fundamentos das Tecnologias Quânticas e sua crescente relevância estratégica para o setor de defesa. A terceira seção descreve a metodologia qualitativa adotada, com foco no mapeamento dos grupos de pesquisa e na análise de suas possíveis interações com o ecossistema de defesa nacional. A quarta seção apresenta os resultados obtidos e está dividida em três subseções: a primeira oferece um panorama abrangente da pesquisa quântica no Brasil; a segunda analisa os grupos que atuam diretamente com Tecnologias Quânticas e possuem potencial de interação estratégica com o setor de defesa. Nesta subseção, os dados são organizados em cinco eixos analíticos: (i) distribuição regional dos grupos; (ii) ano de criação; (iii) instituições que concentram múltiplos grupos relevantes; (iv) natureza institucional das organizações mapeadas; (v) articulações institucionais e parcerias. A última subsecção trata especificamente das temáticas abordadas com potencial de aplicação estratégica. Por fim, a quinta seção discute os principais achados e propõe caminhos para fortalecer a inserção das Tecnologias Quânticas no setor de defesa e consolidar a soberania tecnológica nacional.

TECNOLOGIAS QUÂNTICAS: FUNDAMENTOS, EIXOS TECNOLÓGICOS E ECOSSISTEMAS DE INOVAÇÃO

As Tecnologias Quânticas (TQ) constituem hoje uma das fronteiras mais dinâmicas da ciência e da inovação tecnológica, com potencial de reconfigurar setores estratégicos como defesa, comunicações, sensoriamento, computação de alto desempenho e metrologia de precisão. Fundamentadas em princípios da mecânica quântica — tais como quantização, superposição, emaranhamento e interferência — essas tecnologias derivam de avanços acumulados ao longo do século XX e indicam uma mudança profunda no papel que o conhecimento físico desempenha na sociedade contemporânea (NIELSEN; CHUANG, 2000).

Como sintetizam Araújo Moreira *et al*. (2023), vivencia-se atualmente um momento de inflexão epistemológica: os conceitos fundamentais que outrora serviam apenas à explicação de fenômenos naturais começam a ser mobilizados para aplicações práticas, disruptivas e, em muitos casos, estratégicas. Trata-se de um deslocamento significativo — não apenas de uma etapa científica a outra, mas da própria natureza do que se compreende como possível fazer com o mundo quântico. A física, nesse novo contexto, deixa de ser um campo exclusivamente explicativo para tornar-se também performativo.

Essa transformação foi conceitualmente sistematizada por Dowling e Milburn (2003), que propuseram a distinção entre duas grandes "revoluções" no campo quântico. A primeira ocorreu ao longo do século XX e esteve centrada na formulação dos fundamentos da mecânica quântica. Elas permitiram explicar fenômenos que escapavam à física clássica, como o efeito fotoelétrico, a estabilidade atômica e os espectros de radiação. Esse arcabouço conceitual viabilizou inovações que sustentam a

infraestrutura da era digital, como o laser, o GPS e os transístores, viabilizando a miniaturização de dispositivos eletrônicos e a criação da economia digital (KRELINA; DÚBRAVCIK, 2023). Isto é, essas tecnologias trouxeram vários benefícios para a sociedade, democratizando a informação, contribuindo com o surgimento de smartphones, melhoria de diagnósticos e tratamentos médicos.

Em contraste, a segunda revolução quântica, em curso desde as primeiras décadas do século XXI, é marcada não mais pela descrição, mas pela engenharia deliberada de estados quânticos. O salto qualitativo que caracteriza essa nova etapa reside na possibilidade de projetar, controlar e manipular intencionalmente sistemas regidos por leis quânticas, com vistas à criação de dispositivos e processos inéditos. Como enfatizam Dowling e Milburn (2003), o ser humano deixa de aplicar a ciência apenas para entender o que já existe — como no caso da explicação da tabela periódica ou do comportamento de semicondutores — e passa a empregá-la para construir ativamente novas realidades físicas, como os chamados átomos artificiais, com propriedades eletrônicas e ópticas projetadas sob demanda. Essa transição reflete a passagem do papel de observador para o de engenheiro do mundo quântico: alguém que não apenas interpreta a natureza, mas que projeta e controla estados coerentes ou emaranhados que, embora possíveis na natureza, raramente ocorrem de forma estável e controlada fora dos ambientes altamente especializados dos laboratórios. A partir desses avanços, torna-se viável o desenvolvimento de computadores quânticos, sensores de altíssima precisão, sistemas de criptografia inviolável e redes de comunicação ultrasseguras, entre outras aplicações com alto grau de sofisticação. Em suma, a segunda revolução quântica representa a consolidação de um novo regime tecnológico, sustentado não apenas por avanços científicos, mas também por uma profunda reconfiguração das capacidades humanas de intervenção ativa sobre os estados fundamentais da matéria e da informação (KRELINA; DÚBRAVCIK, 2023).

Ressalta-se que a consolidação das Tecnologias Quânticas como campo estruturado de investigação e desenvolvimento tem sido acompanhada por esforços analíticos no sentido de identificar seus principais domínios tecnológicos. Schleich *et al*. (2016) apresenta uma abordagem fundamentada não na categorização formal de políticas públicas, mas na análise de focos concretos de pesquisa. Seus trabalhos destacam quatro frentes principais: (i) comunicação e criptografia quântica, (ii) computação e teoria da informação quântica, (iii) sensoriamento e metrologia de precisão, e (iv) processamento de informação quântica em corpos sólidos.

A comunicação quântica figura como um dos domínios mais consolidados do ponto de vista experimental. Baseando-se em propriedades como o emaranhamento e a não-clonabilidade de estados quânticos, ela permite a transmissão de informação com segurança física garantida pelas leis da mecânica quântica. Protocolos como o BB84, já testados em redes ópticas de longa distância, exemplificam esse potencial. Além da criptografia, a comunicação quântica abre caminho para a sincronização ultrafina de sistemas e para a interligação de nós computacionais, sendo considerada um componente essencial da futura infraestrutura de redes seguras e possivelmente da chamada "internet quântica" (SCHLEICH *et al*., 2016).

A computação quântica, por sua vez, representa a fronteira mais desafiadora do campo. Ao substituir a lógica binária pela dos qubits que explora os princípios de superposição e emaranhamento para representar e processar estados de forma não clássica, torna-se possível o processamento massivo de informações com vantagens exponenciais em relação a tarefas específicas — como fatoração de inteiros, otimização e simulação molecular (SCHLEICH *et al*., 2016).

O terceiro eixo analisado por Schleich *et al*. (2016) diz respeito ao sensoriamento quântico e à metrologia de alta precisão.

Técnicas como interferometria atômica, armadilhas magnéticas e manipulação de átomos frios são mobilizadas para desenvolver instrumentos com sensibilidade sem precedentes à variação de campos magnéticos, gravitacionais ou elétricos. Os relógios atômicos de nova geração, em especial, são destacados como marcos tecnológicos capazes de redefinir os padrões internacionais de tempo e frequência, com impacto direto sobre sistemas de navegação, telecomunicações e infraestrutura digital. Essa frente combina exigência científica sofisticada com aplicabilidade imediata, inclusive em contextos operacionais críticos.

A quarta vertente é dedicada ao processamento de informação quântica em corpos sólidos. Trata-se da investigação e desenvolvimento de plataformas físicas — como semicondutores, pontos quânticos, íons presos e circuitos supercondutores — capazes de implementar, de forma controlada, os elementos lógicos fundamentais da computação quântica. Essas tecnologias viabilizam a codificação, manipulação e leitura de estados quânticos por meio de dispositivos materiais, constituindo o elo entre a abstração algorítmica da computação quântica e sua materialização em sistemas funcionais. A viabilidade desses sistemas como unidades físicas de processamento quântico é apresentada como etapa crucial para a transição entre experimentos de prova de conceito e aplicações escaláveis (SCHLEICH *et al*., 2016).

Cabe destacar que a consolidação das Tecnologias Quânticas TQ) como campo estratégico de inovação depende não apenas do avanço teórico e experimental dos seus eixos científicos, mas também da existência de ecossistemas institucionais robustos, capazes de sustentar a pesquisa de longo prazo, formar recursos humanos especializados e fomentar interações entre ciência, indústria e Estado. Nesse contexto, os centros e grupos de pesquisa desempenham papel estruturante na arquitetura da inovação quântica, funcionando como polos de conhecimento acumulado,

plataformas de transferência tecnológica e vetores de *spillover* para setores adjacentes. Como aponta Schleich *et al*. (2016), a emergência de empresas e tecnologias disruptivas em TQ tende a ocorrer de forma concentrada em regiões onde há densidade institucional de pesquisa, infraestrutura científica avançada e massa crítica de especialistas.

Exemplos como o *Center for NanoScience* (Munique), o *Joint Quantum Institute* (EUA) e o *Institute for Quantum Computing* (Canadá) ilustram como a presença de centros consolidados permite não apenas o desenvolvimento de novas aplicações, mas também o surgimento de *spin-offs, startups* e mecanismos de cooperação intersetorial. Tais instituições tornam-se catalisadores de inovação ao integrar pesquisa fundamental com experimentação aplicada, promovendo inclusive o desenvolvimento de tecnologias habilitadoras — como criogenia, fotônica avançada, controle quântico e eletrônica de ultrabaixa temperatura — com potenciais efeitos transbordantes para setores como telecomunicações, computação clássica, medicina diagnóstica e defesa (SCHLEICH *et al*., 2016).

Schleich *et al*. (2016) também destaca a relevância de estratégias nacionais voltadas à criação de redes coordenadas de pesquisa, incluindo a implementação de centros "virtuais" para conectar competências geograficamente dispersas e potencializar sinergias entre grupos teóricos e experimentais. Tal abordagem busca evitar a fragmentação do conhecimento e acelerar o ciclo de maturação tecnológica, sobretudo em países com distribuição desigual de capacidades científicas. Nesse sentido, os autores destacam a importância da atuação articulada de grupos de pesquisa não apenas como vetores de desenvolvimento científico, mas também uma variável estratégica no que diz respeito à soberania tecnológica e à autonomia em setores sensíveis.

TECNOLOGIAS QUÂNTICAS NA DEFESA: RELEVÂNCIA GLOBAL E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL

A aplicação das tecnologias quânticas na defesa não se restringe a inovações isoladas; pelo contrário, sua integração tem o potencial de transformar profundamente a dinâmica dos conflitos modernos. Choi (2023), argumenta que essas tecnologias potencializam capacidades já existentes que são essenciais para as operações militares de excelência, como segurança cibernética, sensoriamento, logística militar e comunicações estratégicas.

O impacto das gerações de tecnologias quânticas foi direto e significativo na defesa. Como observou Krelina (2021) enquanto a primeira geração baseou-se na utilização indireta dos efeitos quânticos — como ocorre com lasers, semicondutores e relógios atômicos —, a segunda geração se caracteriza pela capacidade de manipular diretamente os estados quânticos da matéria, como o emaranhamento e a superposição, com vistas a aplicações específicas e de alto grau de controle. Essa virada epistemológica e tecnológica também implicou uma mudança na forma como o poder militar é exercido, pois permite a criação de dispositivos mais sensíveis, seguros e potencialmente superiores aos convencionais. Nesse contexto, sua aplicação ao setor militar tem gerado um campo emergente de debate técnico-estratégico, conhecido como "guerra quântica" (*quantum warfare*), cujas implicações extrapolam a esfera operacional, alcançando doutrinas, políticas públicas, esquemas de governança e dilemas éticos contemporâneos (OLIVEIRA *et al*., 2025).

Krelina e Dúbravcik (2023) apresentam uma matriz analítica que relaciona, de forma sistemática, os diferentes tipos de tecnologias quânticas às funções militares específicas. A computação quântica, por exemplo, oferece vantagens

computacionais significativas para tarefas como a simulação de materiais balísticos avançados, a otimização de cadeias logísticas em cenários dinâmicos e a quebra de códigos criptográficos baseados em fatoração, ameaçando sistemas clássicos como o RSA.

A comunicação quântica, por sua vez, oferece segurança física garantida pelas leis da mecânica quântica. Diferente das comunicações convencionais, nas quais as mensagens podem ser interceptadas sem detecção, qualquer tentativa de espionagem em sistemas quânticos altera os estados envolvidos na transmissão, denunciando a presença do invasor (KRELINA, 2021; KRELINA; DÚBRAVCIK, 2023). A tipologia supracitada tem o potencial de proteger sistemas governamentais e militares, garantindo que as informações transmitidas estejam livres de interceptações (PIRANDOLA *et al*., 2020). O satélite chinês Micius demonstrou a viabilidade dessa tecnologia ao permitir comunicação criptografada entre bases terrestres distantes (PIRANDOLA *et al*., 2020). No setor militar, uma estrutura resiliente de redes terrestres e espaciais que pode assegurar a troca segura de informações entre unidades operacionais, centros de comando e alianças estratégicas, significa uma drástica redução nas vulnerabilidades em cenários de guerra cibernética.

No mesmo sentido, a criptografia quântica surge como uma tecnologia que oferece soluções inovadoras para a segurança cibernética. A distribuição quântica de chaves (QKD) assegura comunicações invioláveis ao explorar o princípio da detecção de interceptações por meio de alterações nos estados quânticos durante a transmissão (KRELINA, 2021; KRELINA; DÚBRAVCIK, 2023). Esse recurso também é crucial para a segurança de comunicações militares, prevenindo ciberataques e espionagem eletrônica, garantindo a integridade dos dados trocados entre bases militares e centros de comando em ambiente de grande ruído (NEUMANN *et al*, 2020).

Além das tipologias acima, os dispositivos (sensores, detectores e atuadores) e a metrologia quânticos também prometem revolucionar a defesa. Dispositivos baseados em efeitos quânticos permitem a detecção ultra-precisa de variações gravitacionais, magnéticas e elétricas, possibilitando avanços em navegação inercial e monitoramento de ameaças. A China, por exemplo, tem se destacado no avanço dos radares quânticos, explorando fenômenos como a superposição e o emaranhamento para detectar aeronaves furtivas e drones, que normalmente permanecem invisíveis aos radares convencionais (KRELINA, 2021; KRELINA; DÚBRAVCIK, 2023).

Apesar do entusiasmo com os avanços anunciados, como destaca *European Parliamentary Research Service* (2024), a governança da inovação quântica requer arranjos políticos e regulatórios capazes de garantir soberania digital e segurança nacional, sob o risco de países tecnologicamente dependentes se tornarem usuários passivos de soluções críticas desenvolvidas no exterior. Nesse sentido, manter grupos de pesquisa ativos e articulados com estratégias estatais de defesa é uma condição essencial para preservar a autonomia decisória em áreas como criptografia, comunicações, navegação e comando e controle.

Da mesma forma, para o contexto brasileiro, pesquisas apontam a necessidade de ecossistemas institucionais coordenados, compostos por universidades, centros de pesquisa civil-militares, Forças Armadas e indústria nacional (AZEVEDO *et al*., 2021; ARAÚJO-MOREIRA *et al*., 2024). Ainda que o Brasil não ocupe uma posição de liderança na corrida tecnológica global, o país demonstra nichos promissores em tecnologias avançadas, que se revelam estratégicas para a vigilância e dissuasão na Amazônia, um papel central do Sistema de Proteção da Amazônia (FURTADO; FRANCHI, 2023), e para o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul, a fim de melhorar a consciência marítima brasileira em sua

Zona Econômica Exclusiva (ZEE) (ANDRADE *et al*, 2019). Tais tecnologias podem oferecer soluções inovadoras para desafios estruturais da defesa brasileira, como a cobertura de áreas remotas e a mitigação de vulnerabilidades em ambientes de guerra cibernética. Em particular, sensores quânticos que operam independentemente de GPS 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).

Em que pese essas oportunidades, o Brasil enfrenta limitações significativas. A baixa continuidade nos investimentos, a dependência de tecnologias estrangeiras e a fragmentação entre os setores científico, militar e produtivo limitam a capacidade nacional de desenvolver soluções autônomas e soberanas (AZEVEDO *et al*., 2021). Como observa Azevedo *et al*. (2021), o Sistema de Inovação em Defesa (SIS-Def) sofre com uma estrutura, fragmentada, desarticulada, e com a ausência de mecanismos eficazes de integração entre os diversos atores envolvidos — incluindo as próprias Forças Armadas, que operam com subsistemas paralelos e pouco integrados. Essa desarticulação e fragmentação comprometem a geração de sinergias, fragmenta os recursos e dificulta a formação de alianças estratégicas com o meio acadêmico e com a Base Industrial de Defesa (BID). Superar esse quadro exige medidas estruturantes que fortaleçam os vínculos entre ciência, defesa e inovação.

Nesse contexto**,** Araújo-Moreira *et al*. (2024), destacam a importância de consolidar grupos de pesquisa ativos, vinculados a estratégias nacionais de defesa e sustentados por políticas públicas consistentes e parcerias internacionais. A articulação entre ciência, tecnologia e soberania deve ser vista como eixo estruturante da estratégia de defesa nacional — não apenas para acompanhar a evolução das potências globais, mas para garantir autonomia decisória em áreas críticas como criptografia, comando e controle,

navegação e sensoriamento. A manutenção de uma postura passiva diante dessa nova fronteira tecnológica colocaria o país em posição de dependência estrutural, com implicações diretas para sua segurança e capacidade de dissuasão (SCHLEICH *et al*., 2016; KRELINA, 2021; AZEVEDO *et al*., 2021; ARAÚJO-MOREIRA *et al*., 2024; OLIVEIRA *et al*., 2025).

METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e exploratória, buscando compreender as interações entre a produção científica em Tecnologias Quânticas no Brasil e o setor de Defesa Nacional. A natureza exploratória justifica-se pela lacuna de levantamentos sistemáticos sobre grupos de pesquisa nessa área e suas conexões com instituições militares e centros de inovação em segurança, em particular, no País (CRESWELL, 2018; FLICK, 2018). A pesquisa qualitativa, por sua vez, permite uma análise aprofundada dos dados textuais e contextuais, essencial para mapear e interpretar as nuances do ecossistema de pesquisa (PATTON, 2014; DENZIN; LINCOLN, 2018).

Os procedimentos de coleta de dados foram realizados por meio de um levantamento sistemático no Diretório de Grupos de Pesquisa (DGP) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). De acordo com Chiarini *et al*. (2022) esta base de dados é amplamente reconhecida pela sua abrangência e relevância para o mapeamento da ciência brasileira, com seu uso em publicações científicas desde 1994, inclusive em periódicos internacionais de alto impacto como a *International Journal of Life Assessment* (SOUZA *et al*., 2017) e *Scientometrics* (CALIARI *et al*., 2020; GUIMARÃES; HUMANN, 1995; LETA; MEIS, 1996). A consolidação do DGP como ferramenta analítica

para o Sistema Nacional de Inovação é evidenciada pela influência de trabalhos como os de Rapini (2007; 2007a), que propuseram metodologias para analisar interações entre universidades e empresas. O reconhecimento da base é tal que, entre 1995 e 2021, um total de 144 artigos científicos utilizaram dados do DGP para suas análises (CHIARINI *et al*., 2022). Esta abordagem de mapeamento sistemático de produção acadêmica é, portanto, consolidada na literatura, sendo empregada para compreender o panorama de diferentes campos de pesquisa no contexto nacional (RAPINI, 2007; ROSA *et al*., 2018; QUARESMA *et al*., 2024).

O perfil dos dados utilizados neste artigo compreende dados primários e dados secundários. Os dados primários consistem nas informações diretamente extraídas do Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq, como nomes dos grupos, linhas de pesquisa, palavras-chave, vínculos institucionais, distribuição regional, ano de criação e redes de parceria. Estes dados foram considerados a base empírica para o mapeamento e a análise. Os dados secundários incluem a literatura científica especializada em Tecnologias Quânticas e Defesa, utilizada para fundamentar o referencial teórico, contextualizar os achados e embasar a discussão dos resultados, conforme a exigência de diálogo com o estado da arte internacional.

A coleta de dados ocorreu em fevereiro de 2025, utilizando os termos de busca “quântico” ou “quântica” nos campos de nome do grupo, nome da linha de pesquisa e palavra-chave da linha de pesquisa. Esta estratégia de busca ampla visou capturar o universo completo da pesquisa quântica no Brasil, sem restrições iniciais quanto à área do conhecimento, formação acadêmica dos pesquisadores ou setor de aplicação, garantindo uma visão abrangente do ecossistema científico nacional (SAUNDERS *et al*., 2019). O resultado inicial retornou 216 grupos de pesquisa conforme descrição na seção “Análise e Discussão”. Em seguida, foi conduzida uma segunda triagem, resultando em 31 grupos voltados

especificamente para Tecnologias Quânticas e que demonstram capacidade de articulação com demandas estratégicas da defesa nacional. Estes grupos foram selecionados considerando o desenvolvimento de linhas de pesquisa aderentes a defesa, áreas de atuação (taxonomias) e a presença de parcerias com instituições militares, centros tecnológicos das Forças Armadas ou empresas estratégicas do setor. Para assegurar a confiabilidade da análise e mitigar vieses, a classificação foi realizada de forma independente por dois pesquisadores especialistas, que atribuíram pontuações aos grupos conforme o grau de aderência aos critérios. As divergências foram harmonizadas por meio de consenso. Os grupos identificados foram analisados com maior profundidade a partir de seis eixos: distribuição regional, ano de criação, instituições com múltiplos grupos relevantes, natureza institucional, articulações institucionais e temáticas de pesquisa com potencial estratégico.

A análise dos dados foi conduzida com auxílio da técnica de Análise de Conteúdo, conforme Bardin (2011), amplamente empregada em trabalhos qualitativos (ASSUNÇÃO; THOMÉ, 2023; CRISTO *et al*., 2024). É importante ressaltar que a condução da etapa de análise dos grupos com potencial de transbordamento, incluindo a utilização das categorias que emergiram da literatura apresentadas nos Quadros 1 e 2 (Taxonomias), configurou uma triangulação teórico-metodológica, cujo objetivo é aprimorar a qualidade e a credibilidade da pesquisa qualitativa (ABDALLA *et al*., 2018; LINCOLN; GUBA, 1985). Além disso, as informações contidas nos referidos quadros foram validadas por especialistas por intermédio da triangulação de pesquisadores, o que contribuiu para a robustez da categorização e, posterior, seleção dos grupos, elevando a credibilidade dos resultados (ABDALLA *et al*., 2018). O principal objetivo dessa técnica, conforme Abdalla *et al*. (2018), é minimizar o viés do pesquisador único e, consequentemente, aumentar a credibilidade, a confiabilidade e a confirmabilidade dos resultados. O rigor metodológico foi uma preocupação constante,

buscando a transparência dos procedimentos e a fundamentação em abordagens reconhecidas na literatura científica internacional (GIVEN, 2008; SILVERMAN, 2013).

ANÁLISE E DISCUSSÃO

A reflexão que permeia os trabalhos que fundamentam esta seção converge para uma constatação de importância estratégica já apontada no referencial teórico: a intrínseca e inseparável interligação entre o avanço científico, o poder de defesa e a capacidade de desenvolvimento nacional. Essa simbiose não se limita a um esforço para meramente equiparar-se a outras potências; ela constitui, de fato, a própria espinha dorsal da autonomia decisória. A habilidade de exercer soberania em domínios sensíveis — desde a inviolabilidade da criptografia e a precisão do comando e controle, até a acurácia da navegação e a eficácia do sensoriamento — é diretamente proporcional à solidez com que essa tríade é concebida e operacionalizada no cenário global contemporâneo. É nesse contexto estratégico que o presente estudo se insere, buscando mapear o universo dos grupos de pesquisa brasileiros dedicados às Tecnologias Quânticas com potencial transbordamento para a defesa. Assim, para atingir os objetivos elencados na introdução deste trabalho, esta seção foi dividida em três subseções: mapeamento dos grupos de pesquisa; análise em profundidade dos grupos com potencial interação com a Defesa; e análise quanto à taxonomia e possibilidade de transbordamentos.

Mapeamento da Pesquisa Quântica no Brasil

O levantamento inicial, com base nos registros disponíveis no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq acessado em fevereiro

de 2025, resultou na identificação de 216 grupos de pesquisa com aderência à temática quântica. Importa destacar que nem todos os grupos identificados desenvolvem estudos diretamente voltados às Tecnologias Quânticas. Como mencionado, o critério de busca adotado fora intencionalmente abrangente, utilizando os termos "quântico" e "quântica" nos campos de nome do grupo, linha de pesquisa e palavras-chave. Esse procedimento permitiu contemplar o conjunto mais amplo da pesquisa quântica, incluindo não apenas as iniciativas voltadas ao desenvolvimento de aplicações tecnológicas, mas também estudos de natureza teórica e experimental nos campos da mecânica quântica fundamental, química quântica, física matemática, cosmologia quântica e interpretações filosóficas da mecânica quântica. Isto é, essa estratégia metodológica visou capturar a amplitude do ecossistema científico nacional sobre temas quânticos, para posteriormente identificar, dentro dele, os grupos com potencial de transbordamento científico-tecnológico voltado à defesa relacionados às Tecnologias Quânticas.

Embora o número total de grupos em Pesquisas Quânticas sugira, à primeira vista, a existência de uma comunidade científica significativa, a análise da sua distribuição geográfica revela uma realidade desigual: há uma nítida concentração de capacidades nas regiões Sudeste (40,3%) e Nordeste (26,6%). Essa predominância regional não é um fenômeno isolado. Ela está em consonância com os dados mais recentes do senso do CNPq (2023), que indicam que 37% dos grupos de pesquisa do país estão concentrados no Sudeste e 27,5% no Nordeste. Esse padrão reflete a centralização histórica dos investimentos em ciência, tecnologia e inovação (CT&I) nessas regiões. Nesse sentido, a configuração espacial dos grupos dedicados às temáticas quânticas não constitui uma exceção, mas sim um sintoma revelador das assimetrias estruturais do sistema científico nacional.

Esse padrão geográfico, ainda que previsível, representa um obstáculo à formulação de uma estratégia nacional verdadeiramente integrada, que mobilize competências técnico-científicas de forma equitativa entre as regiões. A experiência internacional mostra que políticas eficazes em tecnologias emergentes requerem a expansão e a consolidação de centros regionais de excelência, capazes de dialogar com diferentes setores produtivos e de absorver, de forma capilar, os impactos científicos e tecnológicos da chamada segunda revolução quântica (SCHLEICH *et al*., 2016). Assim, a atual concentração institucional e geográfica das capacidades instaladas deve ser compreendida não como dado natural, mas como um desafio político-estrutural que demanda ação coordenada e investimentos descentralizados.

Outro dado relevante diz respeito à natureza institucional dos grupos identificados: a ampla maioria está vinculada a instituições federais (74%) ou estaduais (20%). Esse predomínio do setor público confirma o papel estruturante do Estado na produção científica de fronteira, especialmente em áreas de alta complexidade e baixo retorno imediato, como as tecnologias quânticas. De fato, como apontam Schleich *et al*. (2016), o avanço de tecnologias disruptivas depende de políticas estatais coordenadas, capazes de sustentar a pesquisa básica por longos ciclos de maturação. No entanto, essa concentração também pode revelar uma fragilidade estrutural: a possibilidade de depender quase exclusivamente do financiamento público, o que faz com que o ecossistema nacional de pesquisa fique sujeito a descontinuidades orçamentárias, à rigidez burocrática e à ausência de incentivos mais ágeis para a experimentação tecnológica. Isto é, embora o protagonismo estatal continue sendo indispensável, a consolidação de um campo estratégico como o das pesquisas quânticas exige um modelo institucional mais resiliente, que articule políticas públicas estáveis com mecanismos complementares de financiamento, integração com setores produtivos e capilaridade regional. Sem a existência deste desenho

institucional, o país corre o risco de limitar o potencial transformador da ciência quântica a nichos acadêmicos isolados, desconectados de uma estratégia nacional mais ampla de desenvolvimento e soberania tecnológica.

Grupos de Pesquisa em Tecnologias Quânticas e sua Interação com o Setor de Defesa

Após o mapeamento inicial, realizou-se uma segunda triagem voltada à seleção daqueles grupos cuja atuação se concentra especificamente em Tecnologias Quânticas e que apresentam potencial efetivo de interação com o setor de defesa nacional. O resultado indicou 31 grupos com estas características. A distribuição regional das instituições identificadas revela uma concentração nas regiões Nordeste e Sudeste, cada uma representando 35,48% do total, seguidas pelas regiões Sul (16,13%), Norte (9,68%) e Centro-Oeste (3,23%). Observa-se, portanto, a persistência do padrão de concentração regional já analisado, cuja manutenção tem potencial de comprometer a difusão do conhecimento, restringir a formação de especialistas em escala nacional e limitar a capacidade do Estado de mobilizar competências científico-tecnológicas (SCHLEICH *et al*., 2016).

Ainda que os dados revelem uma persistência de assimetrias estruturais no sistema nacional de CT&I, eles também apontam um sinal promissor: há grupos de pesquisa em Tecnologias Quânticas aderentes à defesa em todas as regiões do país. Essa constatação, longe de ser contraditória, traduz a complexidade do cenário atual. Trata-se de uma agenda ainda emergente, o que confere valor estratégico à existência de polos institucionais distribuídos nacionalmente. Essa presença, mesmo que numericamente modesta, pode servir de base para ampliar a capacidade instalada e construir

uma política pública mais abrangente e articulada. O desafio, portanto, não está apenas em reconhecer esses grupos como ativos dispersos, mas em transformá-los, por meio de ações coordenadas, em uma rede orientada por missões de interesse soberano — como defendem Azevedo *et al*. (2021) — capaz de potencializar o uso dual dessas tecnologias em operações militares.

Com relação à distribuição temporal de criação dos grupos de pesquisa identificados, os dados revelam um padrão de crescimento gradual, com uma concentração mais acentuada na última década. Embora existam registros desde 1973, observa-se que 71% dos grupos analisados foram criados a partir de 2010, o que corrobora a afirmação de que a segunda revolução quântica é um fenômeno recente e em plena consolidação, especialmente no que se refere às suas aplicações na área de defesa (DOWLING; MILBURN, 2003; KRELINA; DÚBRAVČÍK, 2023).

Esse dado sugere que o Brasil não está estruturalmente atrasado no início da corrida tecnológica em questão. Contudo, a forma como o país responderá a essa transição aponta para um risco estratégico. A depender da velocidade com que consolida suas capacidades e da ambição de seus programas nacionais, o Brasil pode permanecer ancorado na lógica da primeira revolução quântica — centrada na ciência fundamental — com uma transição lenta, fragmentada e pouco coordenada para a chamada "engenharia quântica". Essa preocupação é corroborada por Oliveira *et al*. (2023) ao advertir que o Brasil "não pode ficar indiferente" frente ao esforço global em curso.

Outro dado relevante diz respeito à concentração institucional: cinco universidades brasileiras abrigam mais de um grupo de pesquisa voltado às tecnologias quânticas com potencial de transbordamento para o setor de defesa. São elas: Universidade Federal de Santa Maria, Universidade Federal do Pará, Universidade Federal de Pernambuco, Universidade Estadual de Ponta Grossa e o

Centro de Estudos e Sistemas Avançados do Recife. Esse fenômeno pode ser interpretado sob duas perspectivas complementares. Por um lado, reforça o padrão de concentração geográfica e institucional observado ao longo do mapeamento, evidenciando a desarticulação do subcampo e a ausência de uma estratégia nacional coordenada — o que constitui um entrave à consolidação de uma política pública integrada na visão de Azevedo *et al*. (2021). Por outro lado, a presença de múltiplos grupos em uma mesma instituição pode sinalizar o surgimento de polos locais de excelência, capazes de dinamizar a formação de especialistas, fomentar ambientes colaborativos e acelerar a conversão de conhecimento científico em aplicações estratégicas.

Trata-se, portanto, de uma duplicação de esforços que tanto pode indicar falhas de coordenação quanto revelar tentativas espontâneas de articulação interna no âmbito universitário. Nesse sentido, o relatório do Parlamento Europeu sobre tecnologias quânticas aponta que o fortalecimento de grupos de pesquisa altamente especializados é um passo necessário, mas insuficiente, se não estiver inserido em uma estratégia coerente e interconectada em nível nacional (EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE, 2024). É fundamental, portanto, distinguir entre a formação planejada de polos estratégicos e a simples concentração descoordenada de recursos. Para que esses núcleos se convertam, de fato, em ativos de soberania tecnológica e defesa, é indispensável, conforme apontado por Schleich *et al*. (2016), que estejam integrados a uma rede colaborativa nacional, com mecanismos de governança capazes de evitar assimetrias estruturais e transformar excelência localizada em capacidades compartilhadas de interesse público.

Nesse contexto, observa-se um indicativo promissor de articulação institucional por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Informação Quântica (INCT-IQ), que desponta como

uma estrutura de integração científica em potencial. Foram identificados oito grupos de pesquisa vinculados ao INCT-IQ, sediados em instituições distribuídas por diferentes regiões do país — UNESP, UFPE, UFC, UFSM, UFF, UFRJ, UFRN e UFMT — com atuação em áreas como informação quântica, óptica quântica, matéria condensada e sistemas abertos. Ainda que não se configure, até o momento, como um nó articulador plenamente consolidado, como o modelo descrito por Schleich *et al*. (2016), o INCT-IQ representa uma base relevante para a construção de uma rede nacional coordenada, com capacidade de conectar núcleos especializados e induzir trajetórias de inovação voltadas a aplicações estratégicas no setor de defesa.

A análise da natureza institucional dos grupos identificados também revela a manutenção de um padrão já discutido na seção anterior: a predominância expressiva de instituições federais, que correspondem a aproximadamente 71% do total. Como já foi discutido, esse dado reforça o papel estruturante das universidades e institutos federais na produção científica de fronteira no Brasil, sobretudo em áreas de elevada complexidade tecnológica, como é o caso das tecnologias quânticas com potencial de aplicação em defesa. No entanto, traz o mesmo alerta para a necessidade de diversificar os arranjos institucionais, fortalecer mecanismos de financiamento complementar e incentivar a articulação entre diferentes esferas federativas e setores sociais (ARAÚJO-MOREIRA *et al*., 2024). Como mencionado, sem essa diversificação e integração, há o risco de se perpetuar um sistema excessivamente dependente do orçamento público federal, vulnerável a instabilidades políticas e orçamentárias, e limitado em sua capacidade de gerar respostas coordenadas às missões estratégicas do Estado brasileiro (AZEVEDO *et al*., 2021).

Outro achado importante foi o fato de que, dentre os grupos analisados, apenas um apresenta colaboração direta com instituições

militares: o Grupo de Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas (IATQ) do Instituto Militar de Engenharia (IME), que mantém parcerias com 42 instituições, incluindo universidades nacionais e internacionais, centros de pesquisa e empresas do setor privado. Dentre as instituições parceiras do grupo IATQ, 12 são militares, o que pode indicar que a reduzida presença direta de instituições militares no Diretório do DGP não indica, necessariamente, um desinteresse da Defesa ou lacuna estratégica, mas sim uma possível opção por um modelo de colaboração concentrado. Se essa hipótese se confirmar, demonstrará uma importante iniciativa para combater a fragmentação apontada por Azevedo *et al*. (2021). Contudo, não se pode descartar a desarticulação apontada pelos mesmos autores, quando observamos o campo específico das tecnologias quânticas. Um indicador disso é a dispersão dos grupos de pesquisa identificados, somado a baixíssima interação com o setor de defesa, conforme exposto nos parágrafos anteriores.

De maneira geral, os dados mostram que o Brasil possui ilhas de excelência no Sudeste e no Nordeste, mas que ainda não conseguiram estabelecer sinergia com setor de Defesa. Sem essa aproximação, o país poderá vir a dominar a teoria, mas continuará dependente da importação de equipamentos militares e sistemas críticos, configurando uma dependência tecnológica que anula, na prática, a soberania estratégica preconizada por Araújo-Moreira (ARAÚJO-MOREIRA *et al*. 2024).

Assim, a existência de grupos qualificados, mas dispersos em arquipélagos isolados entre si, cria um risco de que esses centros de excelência se tornem meros prestadores de serviço para projetos internacionais, sem que haja transbordamento efetivo para a Base Industrial de Defesa (BID). Em um cenário de corrida tecnológica global, onde potências como EUA e China investem bilhões (OLIVEIRA *et al*., 2025), o capital humano brasileiro altamente qualificado pode ser cooptado para fortalecer a soberania de outras

nações. A soberania, portanto, depende, não só, da existência dos grupos de pesquisa, mas em garantir que eles trabalhem em conjunto para o atendimento do interesse nacional.

Tecnologias Quânticas: Taxonomia, Grupos de Pesquisa e Potencial de Transbordamento para a Defesa

A categorização dos 31 grupos de pesquisa identificados permitiu evidenciar quatro categorias de tecnologias quânticas com potencial de transbordamento (*spillover*) para a defesa nacional. Para orientar essa análise, foi elaborada, com base nos referenciais de Krelina e Dúbravčík (2023) e Schleich *et al*. (2016), uma taxonomia sistematizada no Quadro 1, que organiza as principais tecnologias emergentes no campo das tecnologias quânticas segundo seu grau de aplicabilidade militar e de segurança nacional. A classificação dos grupos considerou suas linhas de pesquisa e palavras-chave associadas, permitindo um cruzamento consistente entre dados empíricos e categorias teóricas. Como resultado, os grupos foram distribuídos em quatro eixos tecnológicos principais: (i) Computação e Informação Quântica, (ii) Comunicação e Criptografia Quântica, (iii) Comunicações, Internet e Redes Quânticas, e (iv) Sensores e Metrologia Quânticos.

Alguns grupos, pela diversidade de suas linhas de pesquisa encaixaram-se em mais de uma das categorias acima elencadas. Os grupos que não ficaram vinculados às tecnologias quânticas elencadas no Quadro 1, foram classificados como grupos vinculados a outras áreas da mecânica quântica (termodinâmica quântica, óptica quântica, materiais quânticos e química quântica) (Quadro 1).

Quadro 1 - Taxonomia das Tecnologias Quânticas e Possíveis Aplicações na Defesa

Tecnologias Quânticas	*Possíveis Aplicações na Defesa (Spillover)*
Computação e Informação Quântica A computação quântica tem várias aplicações militares potenciais, especialmente devido à sua capacidade de processar grandes volumes de dados e resolver problemas complexos mais rapidamente do que computadores clássicos.	- Simulações e modelagem de novos materiais; - Modelagem de sistemas complexos; - Acelerar processamento de grande volume de dados de satélites, drones, sensores militares e redes de vigilância; - Melhorar a previsão de movimentações inimigas e detecção de padrões anômalos; - Realizar a quebra de criptografia clássica; - Otimizar estratégias (defesa e ataque) em tempo real; - Otimizar a Logística e Planejamento Militar; - Outros.
Comunicação e Criptografia Quântica Campo da segurança da informação que usa princípios da mecânica quântica para criar sistemas de comunicação extremamente seguros. A principal vantagem é que qualquer tentativa de interceptação de dados altera o estado quântico da informação, tornando a espionagem detectável.	- Prover comunicações ultras seguras (impossíveis de interceptar) - Minimizar ou evitar a espionagem eletrônica e ataques de guerra cibernética. Qualquer tentativa de interceptação de dados altera o estado quântico da informação, tornando a espionagem detectável; - Aumentar a defesa contra-ataques de hackers, espionagem eletrônica e tentativas de comprometer sistemas de inteligência e infraestruturas críticas de defesa; - Garantir inviolabilidade de informações estratégicas protegidas transmitidas via satélite; - Outros.
Comunicação por Redes Quânticas pelo ar e por fibra Utilizam as leis da mecânica quântica para criar redes ultra seguras a fim de transmitir informações de forma inviolável e extremamente rápida. Diferente das comunicações clássicas, que usam sinais elétricos ou ondas de rádio, as comunicações quânticas exploram o comportamento dos fótons (quantas de luz) para garantir a transmissão de dados).	- Segurança de satélites e redes de comando; - Autenticação segura de sistemas militares; - Protege acesso a redes militares, instalações secretas e sistemas de armas avançados; - Comunicações militares seguras, pois protege transmissões entre bases militares, navios, submarinos, aeronaves e unidades no campo de batalha; - Desenvolver firewalls quânticos para proteger redes governamentais e infraestruturas de defesa - Coordenação de operações militares globais por intermédio de rede extremamente segura e rápida; - Desenvolver sistemas ultra discretos para vigilância; - Permitir que drones militares e robôs autônomos se comuniquem e compartilhem informações em tempo real, sem risco de interferência; - Outros.
Sensores e Metrologia Quânticos Dispositivos (sensores, biossensores, detectores e atuadores) que utilizam os princípios da mecânica quântica para medir grandezas físicas com extrema precisão. Exploram fenômenos como superposição, entrelaçamento e tunelamento quântico para detectar variações mínimas em campos gravitacionais, magnéticos, elétricos ou de movimento. Oferecem precisão muito superior aos sensores convencionais, tornando-os extremamente úteis para civis e militares (dualidade).	- Sistemas de navegação sem necessidade de GPS, evitando interferências ou ataques de guerra eletrônica; - Detecção de Submarinos e Estruturas Subterrâneas (por ex: túneis); - Diminuição da dependência de tecnologias como o sonar, que pode ser detectado e neutralizado pelo inimigo; - Dispositivos quânticos de inércia permitem que submarinos, aeronaves e mísseis naveguem com precisão sem depender do GPS, que pode ser bloqueado ou hackeado; - Independência de sinais de satélite; - Radar quântico para detecção de Aeronaves furtivas (tecnologia *Stealth*); - Defesa contra interferência eletromagnética e guerra eletrônica; - Melhoria da capacidade de satélites espiões com possibilidade de imagens e dados mais precisos; - Monitorar testes nucleares secretos ao detectar variações na gravidade ou no campo eletromagnético causadas por explosões subterrâneas; - Outros.

Fonte: Elaboração própria. Baseada em: Krelina; Dúbravčík (2023); Schleich *et al.* (2016).

A primeira categoria foi nomeada como **Computação e Informação Quântica** e concentra a maior parte das pesquisas, abrangendo **24 grupos**. Esta tecnologia apresenta alto potencial estratégico, especialmente devido à sua capacidade de processar informações de maneira exponencialmente mais eficiente do que os sistemas clássicos. Suas aplicações incluem a modelagem e simulação de novos materiais e sistemas complexos, a análise de grandes volumes de dados provenientes de satélites e sensores militares, a detecção de padrões em operações e a otimização da logística e do planejamento de missões militares. Além disso, a computação quântica é uma ferramenta promissora para o desenvolvimento de novos algoritmos de inteligência artificial aplicada à defesa, permitindo avanços em sistemas de decisão automatizados e criptografia pós-quântica (SHOR, 1997; KRELINA, 2021).

A segunda categoria identificada refere-se à **Comunicação e Criptografia Quântica**, englobando **3 grupos de pesquisa**. A Distribuição Quântica de Chaves (DQC) e as redes quânticas seguras, como discutido por Krelina (2021) e Doda *et al*. (2021), são essenciais para proteger as comunicações militares contra a espionagem. A existência de grupos de pesquisa no Brasil nessas áreas é estratégica, pois garante ao país a possibilidade de desenvolver soberania em um dos pilares da guerra moderna: a segurança da informação. Os avanços nesta categoria incluem o desenvolvimento de redes quânticas seguras para a transmissão de informações sensíveis, a mitigação de vulnerabilidades associadas à espionagem eletrônica e aos ataques de guerra cibernética, a implementação de *firewalls* quânticos para a proteção de infraestruturas críticas e a coordenação de operações militares por meio de canais de comunicação à prova de interceptação.

A área de **Comunicações, Internet e Redes Quânticas** conta com **6 grupos de pesquisa** e representa um avanço disruptivo

na segurança da informação e no desenvolvimento de infraestruturas de comunicação altamente resilientes para aplicações militares. Diferentemente das comunicações clássicas, que dependem de sinais elétricos ou ondas de rádio, as redes quânticas utilizam os princípios da mecânica quântica, explorando o comportamento dos fótons para transmitir dados de forma segura e rápida. Essa tecnologia possibilita a criação de redes altamente protegida para a transmissão de informações estratégicas, garantindo a integridade e a confiabilidade dos dados em ambientes operacionais adversos. No contexto da defesa, suas aplicações incluem a proteção de redes de comando e controle, a autenticação de sistemas militares e a blindagem de comunicações entre bases, navios, submarinos, aeronaves e unidades táticas. Além disso, redes quânticas permitem o desenvolvimento de *firewalls* quânticos para proteção de infraestruturas governamentais e militares contra-ataques cibernéticos. A implementação dessas redes também facilita a coordenação de operações militares globais por meio de sistemas de comunicação confiáveis, reduzindo a vulnerabilidade a tentativas de interceptação e interferência. Outras aplicações incluem a vigilância discreta e a comunicação autônoma entre drones militares e robôs operacionais, viabilizando a transmissão instantânea de informações estratégicas no campo de batalha. O domínio dessa tecnologia representa um diferencial crítico para a soberania nacional, garantindo a superioridade informacional em cenários de conflito e guerra cibernética.

Há também a categoria intitulada **Sensores e Metrologia Quânticos,** a qual embora menos representativa em número de grupos, apenas 2, apresenta alto potencial disruptivo para a defesa. Os sensores quânticos permitem medições extremamente precisas de grandezas físicas, como variações gravitacionais e magnéticas, possibilitando avanços em tecnologias militares. Como aponta o referencial teórico, sensores quânticos podem viabilizar a navegação em ambientes sem GPS, como na Amazônia e na vastidão marítima da "Amazônia Azul" (CHEN *et al*., 2013; LIAO *et al*., 2018). A

capacidade de detectar alvos furtivos com radares quânticos, mencionada por Chen *et al*. (2013) e Krelina (2021), é outra aplicação de altíssimo valor estratégico para a vigilância do território nacional.

Quadro 2 – Outras áreas da Mecânica Quântica e Possíveis Aplicações na Defesa

Outras Áreas da Mecânica Quântica	*Possíveis Aplicações na Defesa*
Termodinâmica Quântica	- Motores térmicos quânticos podem levar ao desenvolvimento de sistemas de propulsão mais eficientes; - Sistemas de refrigeração quântica ultra eficientes, garantindo desempenho ideal de computadores quânticos militares em operações críticas; - Melhoria da eficiência energética para sistemas militares - Melhoria da eficiência de baterias e geradores de energia, permitindo que equipamentos militares operem por mais tempo sem reabastecimento. Aplicação em drones, satélites e veículos militares que precisam de autonomia prolongada; - Aprimorar armas de energia dirigida (laser militar), por meio de maior eficiência no controle da dissipação térmica; - Impulsionar o desenvolvimento de sistemas de defesa antimísseis baseados em laser; - Outros.
Materiais Quânticos	- Desenvolvimento de supercondutores, fins redução de resistência na condutividade elétrica; - Desenvolvimento de isolantes topológicos (resistente a impurezas e interferências); - Desenvolvimento de condutores exóticos (propriedades ajustáveis); - Desenvolvimento de materiais bidimensionais (Ex.: grafeno); - Junções Josephson e Arrays de junções Josephson (sensores de campo magnético; emissores de micro-ondas de alta frequência e precisão); - Outros.
Química Quântica	- Modelar novos explosivos mais potentes e seguros, otimizando sua composição sem necessidade de testes físicos extensivos; - Melhorar combustíveis de mísseis, foguetes e veículos hipersônicos, aumentando sua eficiência e alcance; - Outros.

Fonte: Elaboração própria. Baseada em: CNPq (2025).

Por oportuno, é mister esclarecer que, embora apenas 31 dos 216 grupos de pesquisa estejam trabalhando em temas diretamente

vinculados às tecnologias quânticas com potencial de transbordamento (*spillover*) para a Defesa, os demais grupos possuem linhas de pesquisa em assuntos como termodinâmica quântica, óptica quântica, materiais quânticos e química quântica que, de alguma forma, mesmo que indiretamente, poderão contribuir com o desenvolvimento de setores específicos para a Defesa, conforme demonstra o Quadro 2.

Entre os grupos de pesquisa em Tecnologias Quânticas com potencial de transportamento, cabe destacar o grupo vinculado ao Instituto Militar de Engenharia (IME), cuja atuação abrange de forma integrada as principais categorias de Tecnologias Quânticas identificadas neste estudo. Diferentemente da maioria dos grupos analisados, que se concentram em uma ou duas frentes tecnológicas específicas, o grupo liderado pelo IME adota uma abordagem transversal, reunindo competências em computação, comunicação, dispositivos, criptografia e metrologia quântica, além de possuir, também, linhas de pesquisa voltadas para outras áreas da mecânica quântica. Essa característica multi, inter e transdisciplinar, aliada ao seu posicionamento institucional estratégico, confere-lhe um papel singular no ecossistema nacional de inovação em defesa. Além de desenvolver pesquisas voltadas à aplicação direta no setor militar, o grupo opera como um elo estruturante entre os diferentes atores do tríplice hélice (acadêmicos, empresariais e governamentais), favorecendo a integração de agendas científicas e operacionais. Sua atuação evidencia, portanto, não apenas a necessidade, mas a viabilidade de centros catalisadores que unifiquem esforços de pesquisa em Tecnologias Quânticas com vistas à soberania tecnológica e à prontidão estratégica do Estado brasileiro.

Por fim, analisa-se que para efetivamente traduzir o potencial das TQ em capacidades estratégicas para a defesa nacional, é fundamental não apenas o investimento em pesquisa no país e promoção de redes de colaboração, mas também a superação das

barreiras à inovação que permeiam o setor. Conforme discutido por Azevedo *et al*. (2021), a construção de uma cultura organizacional que valorize a colaboração e a superação de entraves estruturais, são passos cruciais para fortalecer o ecossistema de inovação em defesa em tecnologias quânticas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo mapear os grupos de pesquisa brasileiros que desenvolvem estudos em Tecnologias Quânticas e analisar suas possíveis interações com o setor de defesa nacional, considerando o potencial de transbordamento científico-tecnológico, com vistas ao fortalecimento da soberania nacional.

Os achados da pesquisa evidenciam a existência de um ecossistema científico em formação, com núcleos relevantes de competência distribuídos pelo território nacional, ainda que com maior concentração nas regiões Sudeste e Nordeste, e predominantemente vinculados a instituições federais de ensino e pesquisa.

A partir do universo inicial de 216 grupos de pesquisa registrados no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq, foram encontrados 31 grupos cuja atuação incide diretamente sobre Tecnologias Quânticas com aplicações potenciais no setor de defesa nacional. A categorização desses grupos revelou quatro eixos tecnológicos de destaque: (i) computação e informação quântica; (ii) comunicação e criptografia quântica; (iii) redes e internet quânticas; e (iv) sensores e metrologia quânticos. Cada um desses domínios tecnológicos apresenta aplicabilidades críticas aos setores de Defesa e Segurança, como o desenvolvimento de sistemas de comunicação invioláveis, algoritmos de inteligência artificial pós-quântica,

sensores de alta precisão para navegação autônoma e radares capazes de detectar alvos furtivos. Trata-se de um potencial disruptivo capaz de contribuir fortemente para o aprimoramento das capacidades operacionais, informacionais e cibernéticas das Forças Armadas, sendo, portanto, estratégica para o fortalecimento das competências nacionais em segurança e defesa.

Observou-se uma reduzida presença direta de instituições militares no conjunto de grupos de pesquisa mapeados, corroborando com as pesquisas sobre a desarticulação do Sistemas de Inovação em Defesa com os demais sistemas de inovação do país. Em outras palavras entre os atores do tríplice hélice, especificamente, entre a Defesa e a academia no que tange ao segmento de tecnologias quânticas.

No que se refere ao número de grupos de pesquisa de instituições militares nota-se também reduzida participação no universo de grupos mapeados. Porém, ao aprofundar o estudo, analisou-se que este fenômeno não implica, necessariamente, uma lacuna estratégica. Os dados sugerem uma possível opção institucional por um modelo de colaboração concentrado, em que as Forças Armadas operam em articulação com centros acadêmicos consolidados. Nesse sentido, destaca-se a atuação do Instituto Militar de Engenharia (IME), cujo grupo de pesquisa em Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas busca inserção em redes nacionais e internacionais, em ampla rede de parcerias com universidades, centros civis e empresas do setor tecnológico, funcionando como um polo catalisador de inovação dual (civil-militar e doutrinária-tecnológica). Esse modelo integrador pode servir de referência para futuras iniciativas voltadas à construção de competências científicas, tecnológicas e doutrinárias de uso estratégico. Algo que as pesquisas sobre o Sistema de Inovação da Defesa já apontavam como necessário.

Outro achado relevante refere-se ao papel do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Informação Quântica (INCT-IQ) como elemento estruturante da produção científica nacional na área. A vinculação de diversos grupos a essa rede demonstra a existência de uma comunidade científica coesa, com capacidade de cooperação e potencial de resposta a demandas estratégicas do Estado brasileiro. Tal estrutura pode e deve ser fortalecida por políticas públicas que promovam a convergência entre as agendas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I) e os interesses da segurança e da defesa, com vistas a diminuir a dispersão das ilhas de excelência situados em arquipélagos isolados no país.

Todavia, a pesquisa também evidencia algumas lacunas que demandam atenção. Sabe-se que a consolidação da pesquisa em Tecnologias Quânticas como vetor de soberania tecnológica ainda requer o enfrentamento de desafios estruturais (laboratórios, recursos humanos, infraestrutura de pesquisa etc.). Desafios estes que não foram abordados nesta pesquisa, mas que carecem de aprofundamentos, pois comprometem diretamente a articulação entre os grupos de pesquisa examinados. Trata-se de uma limitação cuja presença se impõe com clareza, mesmo à margem de análises mais aprofundadas. Nesse sentido, torna-se imperativo o fortalecimento de programas estratégicos voltados à formação de recursos humanos especializados, ao fomento à pesquisa dual-use, à ampliação das parcerias entre instituições civis e militares, à ampliação de investimentos em infraestrutura laboratorial, bem como o estabelecimento de instrumentos regulatórios que estimulem a inovação em Tecnologias Quânticas orientada à Defesa.

Nesse sentido, um dos achados mais críticos da pesquisa diz respeito ao descompasso entre soberania científica e soberania tecnológica. Embora o Brasil disponha de grupos altamente qualificados e internacionalmente conectados, a ausência de mecanismos institucionais que promovam a conversão do

conhecimento em soluções tecnológicas autóctones limita severamente o impacto estratégico dessas iniciativas. Como aponta o referencial teórico, a fragmentação do Sistema Nacional de Inovação em Defesa dificulta a articulação entre produção científica e necessidades operacionais, gerando um hiato que compromete a autonomia nacional. Assim, a soberania em Tecnologias Quânticas não se esgota na existência de grupos de pesquisa, mas requer a consolidação de um ecossistema de inovação orientado ao interesse estratégico do Estado brasileiro.

Além disso, à luz dos resultados obtidos, recomenda-se a formulação de estratégias nacionais específicas para o fomento às Tecnologias Quânticas com enfoque em defesa, contemplando a criação de centros interinstitucionais de excelência, o fortalecimento das redes de cooperação científica e a ampliação da participação do setor militar nos ambientes de pesquisa e inovação.

Em síntese, foi possível observar que o Brasil dispõe de uma base científica qualificada e em expansão no campo das Tecnologias Quânticas, cuja mobilização estratégica poderá contribuir decisivamente para a construção de capacidades autônomas em Defesa e Segurança. Em um mundo cada vez mais orientado pela supremacia informacional, a integração das Tecnologias Quânticas ao setor de defesa, por sua natureza disruptiva e transversal, constitui uma dimensão estratégica incontornável para assegurar a soberania e impulsionar o desenvolvimento científico-tecnológico do País.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. M. *et al*. “Quality in qualitative organizational research: Types of triangulation as a methodological alternative”. **Administração: Ensino e Pesquisa**, vol. 19, n. 1, 2018.

ANDRADE, I. O. *et al*. **Sistema de gerenciamento da Amazônia Azul**: soberania, vigilância e defesa das águas jurisdicionais brasileiras. Brasília: Ipea, 2019.

ARAÚJO-MOREIRA, F. M. *et al*. "Tecnologias quânticas: uma questão de soberania nacional". **Revista da Escola de Guerra Naval**, vol. 30, n. 3, 2024.

ASSUNÇÃO, L. L. R.; THOMÉ, C. "Gestão por competências na administração pública: uma revisão sistemática". **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 16, n. 47, 2023.

AZEVEDO, C. E. *et al*. "Desafios para a política de inovação no setor de defesa brasileiro: óbices e barreiras culturais e estruturais". **Revista da Escola de Guerra Naval**, vol. 27, n. 1, 2021.

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

CALIARI, T. *et al*. "Research infrastructures in less developed countries: the Brazilian case". **Scientometrics**, vol. 122, 2020.

CHEN, Y. *et al*. "Quantum radar technology and its developments". **International Conference on Communications, Circuits And Systems**. Ottawa: ICCCS, 2013.

CHIARINI, T. *et al*. **Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPQ**: Trajetórias e contribuições acadêmicas. Brasília: Ipea, 2022.

CHOI, D. **Quantum Technology and the Military—Revolution or Hype? The Impact of Emerging Quantum Technologies on Future Warfare**. Virginia: Marine Corps Universuty Press, 2023.

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Painel DGP**: perfil da pesquisa no Brasil com base nos dados do Diretório dos Grupos de Pesquisa. Brasília: CNPq, 2023.

CRESWELL, J. W. **Research Design**: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018.

CRISTO, E. M. C. *et al*. "Vínculos organizacionais: produção científica em anais de encontros da ANPAD (2019-2023)". **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 18, n. 53, 2024.

DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y S. **The SAGE Handbook of Qualitative Research**. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2018.

DODA, M. *et al*. "Quantum key distribution overcoming extreme noise: simultaneous subspace coding using high-dimensional entanglement". **Physical Review Applied**, vol. 15, n. 3, 2021.

DOWLING, J. P.; MILBURN, G. J. "Quantum technology: the second quantum revolution". **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 361, n. 1809, 2003.

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

FLICK, U. **An Introduction to Qualitative Research**. Los Angeles: SAGE Publications, 2018.

FURTADO, E. B.; FRANCHI, T. "O Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM): uma estratégia de monitoramento ambiental e dissuasão para a Amazônia brasileira". **Revista de Geopolítica**, vol. 14, n. 4, 2023.

GIVEN, L. M. **The SAGE Encyclopedia of Qualitative Research Methods**. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2008.

GUIMARÃES, J. A.; HUMANN, M. C. "Training of human resources in science and technology in Brazil: the importance of a vigorous post-graduate program and its impact on the development of the country". **Scientometrics**, vol. 34, n. 1, 1995.

KANIA, E. B. "Quantum Hegemony? China's Ambitions and the Challenge to U.S. Innovation Leadership". **Center for a New American Security** [2020]. Disponível em: <www.cnas.org>. Acesso em: 12/03/2025.

KRELINA, M. "Quantum technology for military applications". **EPJ Quantum Technology**, vol. 8, n. 24, 2021.

KRELINA, M.; DÚBŘAVČÍK, D. "Quantum Technology for Defence: What to Expect for the Air and Space Domains". **The Journal of the JAPCC**, vol. 37, 2023.

LETA, J.; MEIS, L. "A profile of science in Brazil". **Scientometrics**, vol. 35, n. 1, 1996.

LIAO, S. *et al*. "Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network". **Physical Review Letters, College Park**, vol. 120, n. 3, 2018.

LINCOLN, Y. S.; GUBA, E. G. **Naturalistic inquiry**. Beverly Hills: Sage, 1985.

NEUMANN, N. M. P. *et al*. "Quantum communication for military applications". **arXiv** [2020]. Disponível em: <www.arxiv.org>. Acesso em: 03/04/2025.

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

OLIVEIRA, T. F. *et al*. "O papel das tecnologias quânticas na disputa geopolítica entre grandes potências e seu impacto na defesa do Brasil". **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 22, n. 65, 2025.

PATTON, M. Q. **Qualitative research and evaluation methods**: Integrating theory and practice. Thousand Oaks: Sage publications, 2014.

PIRANDOLA, S. *et al*. "Advances in quantum cryptography". **Advances in Optics and Photonics**, vol. 12, 2020.

QUARESMA, T. S. *et al*. "Análise da produção científica dos grupos de pesquisa na área da Educação Física da região Norte entre os anos de 2017 a 2021". **Revista Brasileira de Ciências do Esporte**, vol. 46, 2024.

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

RAPINI, M. S. "O Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq e a interação universidade-empresa no Brasil: uma proposta metodológica de investigação". **Revista de Economia Contemporânea**, vol. 11, n. 1, 2007a.

ROSA, A. C. *et al*. "Capacidade de absorção e desempenho inovativo: uma análise para as firmas interativas com grupos de pesquisa universitários das áreas das engenharias do Rio Grande do Sul". **Revista Brasileira de Economia de Empresas**, vol. 18, n. 1, 2018.

SAUNDERS, M. *et al*. **Research Methods for Business Students**. Harlow: Pearson Education, 2019.

SCHLEICH, W. P. *et al*. "Quantum technology: from research to application". **Applied Physics *B***, vol. 122, n. 130, 2016.

SHOR, P. W. "Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer". **SIAM Journal on Computin**g, vol. 26, n. 5, 1997.

SILVERMAN, D. **Doing Qualitative Research**: A Practical Handbook. Los Angeles: SAGE Publications, 2013.

SOUZA, C. G. *et al*. "Life cycle assessment research in Brazil: characteristics, interdiciplinarity, and applications". **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 22, n. 2, 2017.