O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratizacão mundial do conhecimento.



BOLETIM DE CONJUNTURA

BOCA

Ano VII | Volume 22 | Nº 65 | Boa Vista | 2025

http://www.ioles.com.br/boca

ISSN: 2675-1488

https://doi.org/10.5281/zenodo.15612096

BOLETIM DE CONJUNTURA

www.ioles.com.br/boca

O PAPEL DAS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS NA DISPUTA GEOPOLÍTICA ENTRE GRANDES POTÊNCIAS E SEU IMPACTO NA DEFESA DO BRASIL[1]

Thays Felipe David de Oliveira[2]

Carlos Eduardo Franco Azevedo[3]

Fernando Manuel Araújo-Moreira[4]

Resumo

Tecnologias baseadas na mecânica quântica — como superposição, emaranhamento e interferência — estão impulsionando uma corrida tecnológica com implicações diretas para a segurança e a defesa. Computadores quânticos, criptografia inviolável e sensores ultrassensíveis já integram estratégias militares de grandes potências como Estados Unidos, China e União Europeia. Este artigo analisa o papel das tecnologias quânticas na disputa geopolítica entre essas potências e seus possíveis impactos para a defesa do Brasil. A pesquisa adota abordagem qualitativa, com estudo de caso, revisão bibliográfica e análise de cenários, com base em fontes especializadas. Os dados foram obtidos por meio de levantamento secundário em fontes especializadas em defesa. Os resultados indicam que o domínio dessas tecnologias já gera vantagens estratégicas, especialmente no aprimoramento das capacidades de comando, controle, comunicações, computação e reconhecimento (C4ISR). Elas ampliam o alcance da guerra cibernética, desafiam sistemas atuais de criptografia, permitem detectar ameaças furtivas e revolucionam a navegação em ambientes GPS-negado. No Brasil, embora ainda distante da liderança global, visualiza-se aplicações estratégicas no campo da proteção da Amazônia, das fronteiras e das comunicações militares. Conclui-se que as tecnologias quânticas representam riscos e oportunidades. Investimentos consistentes, parcerias internacionais e políticas de inovação são essenciais para posicionar o Brasil como ator relevante nesse campo emergente.

Palavras-chave: Defesa Nacional; Geopolítica; Tecnologias Disruptivas; Tecnologias Quânticas.

Abstract

Technologies based on quantum mechanics—such as superposition, entanglement, and interference—are driving a technological race with direct implications for security and defense. Quantum computers, unbreakable cryptography, and ultra-sensitive sensors are already part of the military strategies of major powers such as the United States, China, and the European Union. This article analyzes the role of quantum technologies in the geopolitical dispute between these powers and their possible impacts on Brazil's defense. The research adopts a qualitative approach, with a case study, literature review, and scenario analysis, based on specialized sources. The data were obtained through secondary research in specialized defense sources. The results indicate that mastering these technologies already generates strategic advantages, especially in improving command, control, communications, computing, and reconnaissance (C4ISR) capabilities. They expand the reach of cyber warfare, challenge current encryption systems, allow the detection of stealth threats and revolutionize navigation in GPS-denied environments. In Brazil, although still far from global leadership, strategic applications are foreseen in the field of protecting the Amazon, borders and military communications. It is concluded that quantum technologies represent risks and opportunities. Consistent investments, international partnerships and innovation policies are essential to position Brazil as a relevant player in this emerging field.

Keywords: Disruptive Technologies; Geopolitics; National Defense; Quantum Technologies.

[1] A presente pesquisa contou com o apoio institucional da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

[2] Professora do Centro Universitário Estácio do Recife. Doutora em Ciência Política pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: thays.felipe@ime.eb.br

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

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

INTRODUÇÃO

As tecnologias quânticas, fundamentadas em princípios como superposição, emaranhamento e interferência, estão promovendo transformações profundas na forma como as nações organizam suas estratégias de segurança, inteligência e defesa. Ao combinar ciência de ponta com aplicações militares e geopolíticas, essas tecnologias configuram uma nova fronteira da corrida tecnológica global. Computadores quânticos, sensores de altíssima precisão e comunicações invioláveis estão entre as inovações que prometem redefinir o poder estratégico das nações no século XXI.

A crescente atenção que Estados Unidos, China e União Europeia têm dedicado ao desenvolvimento de capacidades quânticas no setor de defesa justifica a necessidade de aprofundar o debate sobre os riscos e oportunidades dessas tecnologias em países em desenvolvimento, como o Brasil. Diante de um cenário geopolítico marcado por disputas por soberania digital e supremacia tecnológica, compreender como o Brasil pode se posicionar de forma soberana e estratégica torna-se uma questão premente para a segurança nacional.

Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo analisar o papel das tecnologias quânticas na disputa geopolítica entre grandes potências e seus impactos potenciais para o setor de defesa brasileiro. Busca-se, com isso, contribuir para a formulação de políticas públicas e estratégias nacionais voltadas ao fortalecimento da soberania tecnológica.

Metodologicamente, a pesquisa adota uma abordagem qualitativa de caráter exploratório, ancorada na metodologia de estudo de caso, combinando levantamento bibliográfico e análise de cenários prospectivos. O foco analítico recai sobre o exame de documentos científicos, estratégicos e institucionais que tratam da aplicação das tecnologias quânticas na área de defesa, em especial no Brasil.

Do ponto de vista conceitual, o texto fundamenta-se na literatura que distingue as duas gerações de tecnologias quânticas. A primeira, iniciada no início do século XX e baseada em efeitos como tunelamento e quantização, foi responsável por descobertas que impactaram diretamente a sociedade, como o laser e os transistores, que deram origem à miniaturização de dispositivos eletrônicos e possibilitaram a criação de computadores, *smartphones*, internet e toda a economia digital contemporânea. Essas inovações revolucionaram áreas como comunicação, saúde e transporte, promovendo a democratização da informação e transformando o trabalho e as relações econômicas. A segunda, denominada revolução quântica 2.0, está expandindo as possibilidades, proporcionando inovações disruptivas, como computadores quânticos, sistemas de comunicação e criptografia quântica, sensores de alta precisão, internet quântica e simuladores quânticos. Além disso, foram mobilizados conceitos como guerra informacional, soberania tecnológica, geopolítica e corrida tecnológica.

O artigo está estruturado em cinco seções, além desta introdução. A segunda seção apresenta os fundamentos científicos e as características das tecnologias quânticas, com destaque para a distinção entre a primeira e a segunda geração. Na terceira seção, analisa-se o uso dessas tecnologias no setor de defesa, com foco nas aplicações emergentes e no conceito de domínio quântico. A quarta seção aborda o panorama geopolítico internacional, com ênfase nos investimentos e estratégias adotadas por Estados Unidos, China e União Europeia. A quinta seção discute os impactos e desafios para o Brasil, considerando sua realidade institucional, científica e militar. Por fim, a sexta seção apresenta as considerações finais, destacando os riscos, oportunidades e recomendações estratégicas para o país no contexto da nova corrida tecnológica quântica.

CONCEITOS, CARACTERÍSTICAS E DESAFIOS RELACIONADOS ÀS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS

Conforme apontam Nielsen e Chuang (2000), o estudo das Tecnologias Quânticas é tido como um campo emergente que envolve conhecimentos inter e multidisciplinar provenientes principalmente da física, engenharia, matemática, química, filosofia, dentre outras áreas do saber. Segundo Araújo-Moreira *et al* (2023) a física quântica é uma das áreas mais promissoras da física moderna e pode levar a avanços consideráveis na área de tecnologia da informação e computação quântica. Para os autores, este é um momento de transição das tecnologias da primeira geração quântica para as de segunda. Sem dúvida alguma, a primeira revolução neste campo trouxe muitos benefícios para a sociedade, contudo, a Revolução Quântica 2.0, impactará sobremaneira a forma como vemos o mundo, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparação entre gerações quânticas (aspectos básicos)

Aspectos	1ª Geração	2ª Geração
Princípios quânticos	Quantização, Dualidade onda-partícula tunelamento	Superposição; emaranhamento (ou entrelaçamento); interferência
Estágio atual	Tecnologias maduras	Tecnologias emergentes
Tecnologias associadas	Laser industriais Transistores Relógios *GPS*	Computação quântica Criptografia quântica Comunicação quântica Sensores quânticos Internet e rede quânticas
Benefícios diretos	Miniaturização de dispositivos eletrônicos; Criação de computadores *Smartphones* Internet e toda a infraestrutura digital moderna.	Comunicações invioláveis por meio da Distribuição de Chaves Quânticas (DCQ) Ampliação da segurança cibernética Confiabilidade na transmissão de dados Simulação
Impacto para sociedade	Democratização da informação Transformação do trabalho Melhoria dos diagnósticos e tratamentos médicos Surgimento da economia digital	Além de potencializar o impacto da primeira geração, irá propiciar avanços ainda significativos em medicina, ciência dos materiais, e inteligência artificial; Contribuir com o desenvolvimento de novas formas de segurança de dados e de informações Acelerar a descoberta de novos materiais e soluções para a produção de energia limpa e sustentável, além de otimizar o uso de recursos naturais.

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de DOWLING; MILBURN (2003); BIAMONTE *et al*. (2017); ACÍN *et al.* (2018).

A primeira geração baseou-se na utilização de fenômenos quânticos para desenvolver dispositivos que, embora não manipulassem diretamente estados quânticos complexos, dependiam de princípios fundamentais da mecânica quântica. Exemplos emblemáticos incluem o laser, o transistor e a ressonância magnética, todos eles possíveis graças à compreensão inicial dos efeitos quânticos, como o tunelamento e a quantização de energia (HAROCHE; RAIMOND, 2006).

Já a segunda geração (ou Revolução Quântica 2.0) representa um novo paradigma, pois busca manipular ativamente os estados quânticos individuais — como superposição e emaranhamento — com o objetivo de desenvolver aplicações inovadoras. Dentre essas aplicações, os computadores quânticos assumem um papel central. Ao contrário dos computadores clássicos, que operam com bits binários (0 ou 1), os computadores quânticos utilizam *qubits*, que podem estar simultaneamente em múltiplos estados graças ao princípio da superposição (ARAÚJO-MOREIRA *et al*., 2023).

De acordo com Araújo-Moreira *et al*. (2023), estamos em uma fase de transição entre essas gerações, marcada pelo desenvolvimento de protótipos de processadores quânticos e pela crescente atenção de governos, universidades e empresas ao potencial disruptivo dessas tecnologias. A segunda geração das tecnologias quânticas promete revolucionar áreas como criptografia, otimização, simulação de materiais, inteligência artificial e, especialmente, a computação quântica, a qual desafia os limites da computação tradicional.

Contudo, essa transição não ocorre sem obstáculos. Entre os principais desafios enfrentados pelo campo, destacam-se: a estabilidade dos *qubits* (decoerência quântica), a necessidade de correção de erros quânticos, o desenvolvimento de algoritmos eficientes para arquiteturas quânticas e a capacitação de profissionais em uma área que exige domínio simultâneo de diversas disciplinas científicas (NIELSEN; CHUANG, 2000; PRESKILL, 2018).

Nesta senda, Bertolami (2016) afirma que as tecnologias quânticas de segunda geração nos permitem organizar e controlar os componentes de um complexo sistema governado pelas leis da física quântica e pelos seus princípios baseados em fenômenos como superposição, entrelaçamento (ou emaranhamento) e interferência, os quais, segundo o autor, desafiam as limitações da física clássica.

Vale ressaltar que o conceito de superposição é um dos pilares da física quântica. Ele descreve a capacidade de uma partícula quântica, como um elétron ou um fóton, de existir em múltiplos estados ao mesmo tempo até que sejam medidos. Em um exemplo clássico, podemos imaginar uma moeda lançada para o alto: no mundo macroscópico, ela estará em "cara" ou "coroa", mas uma partícula quântica poderia, metaforicamente, estar em "cara" e "coroa" simultaneamente. Esse fenômeno é essencial para a computação quântica, pois permite que *qubits* (bits quânticos) realizem cálculos de forma exponencialmente mais rápida do que os bits binários da computação clássica (SHOR, 1997).

Outro princípio central da mecânica quântica é o entrelaçamento quântico, no qual partículas correlacionadas têm seus estados mutuamente influenciados, independentemente da distância. Essa propriedade, criticada por Einstein como "ação fantasmagórica à distância", foi confirmada por experimentos conduzidos por Alain Aspect na década de 1980, os quais evidenciaram a violação das desigualdades de Bell, invalidando teorias de variáveis ocultas locais e comprovando a não-localidade quântica (ASPECT; DALIBARD; ROGER, 1982). As descobertas de Aspect forneceram bases sólidas para o avanço de tecnologias como a criptografia quântica, a telecomunicação segura e a computação quântica, consolidando sua contribuição como um marco na física moderna.

Por sua vez, o conceito de interferência quântica é essencial para o processamento de informação. Na interferência, as ondas quânticas de partículas podem combinar-se de maneiras que ampliam ou anulam certos resultados. Na computação quântica, isso permite o desenvolvimento de algoritmos que, ao explorarem caminhos simultâneos, encontram soluções para problemas complexos de forma mais eficiente do que métodos tradicionais (NIELSEN; CHUANG, 2010).

Isto posto, cabe aprofundar a discussão sobre as principais tecnologias quânticas. Primeiramente, serão tratados alguns aspectos sobre a computação quântica, na qual reside os principais desafios do setor na atualidade. Computadores quânticos e clássicos representam paradigmas distintos para o processamento de informações, baseando-se em princípios físicos diferentes. Enquanto a computação clássica se fundamenta na eletrônica digital e na manipulação de *bits* binários (0 e 1), a computação quântica utiliza princípios da mecânica quântica, como superposição, entrelaçamento e interferência, para manipular dados em *qubits*, que podem existir em múltiplos estados ao mesmo tempo (NIELSEN; CHUANG, 2010).

De forma complementar, o quadro abaixo demonstra as principais diferenças entre os dois tipos de computação, para melhor entendimento sobre as principais distinções entre computação quântica e computação clássica:

Quadro 2 – Distinção entre computador clássico e o quântico

Características	Computador Clássico	Computador Quântico
Unidade básica de informação	Bit (0 ou 1)	Qubit (0 e 1 simultaneamente)
Número de estados simultâneos por unidade	1 estado (0 ou 1)	Múltiplos estados (superposição)
Modelo de processamento	Sequencial e determinístico	Paralelo e probabilístico
Exemplo de algoritmo otimizado	Busca binária	Algoritmo de Grover (busca em banco de dados)
Aplicabilidade ideal	Tarefas convencionais (e-mails, editores de texto, jogos, etc.)	Problemas complexos (otimização, criptografia, simulação molecular)
Capacidade de paralelismo	Baixa (simulação por múltiplos núcleos)	Alta (explora todas as possibilidades simultaneamente)

Fonte: Elaboração própria. Adaptado de Nielsen; Chuang (2010); Yanofsky; Mannucci (2008); Preskill (2018).

Na computação clássica, os processadores operam segundo a lógica binária, onde cada *bit* pode estar em um estado específico (0 ou 1) a cada momento. Esta estrutura de dados permite realizar operações lógicas e aritméticas através de portas lógicas que processam esses *bits* de forma sequencial e determinística. Apesar dos avanços significativos em velocidade e capacidade de processamento dos computadores clássicos, eles enfrentam limitações para resolver certos tipos de problemas, especialmente aqueles que requerem processamento paralelo de uma grande quantidade de combinações (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

Em contraste, a computação quântica utiliza *qubits*, que aproveitam a superposição quântica para representar múltiplos estados simultaneamente. Um *qubit* pode estar em uma combinação de 0 e 1, possibilitando que sistemas quânticos processem uma quantidade exponencialmente maior de dados em comparação com sistemas binários tradicionais. Além disso, o entrelaçamento quântico permite que *qubits* correlacionados mantenham uma interdependência instantânea, independentemente da distância entre eles, e isso aumenta a capacidade de processamento paralelo e a eficiência em algoritmos específicos, como os de fatoração e otimização (SHOR, 1997; PRESKILL, 2018).

As diferenças entre os dois tipos de computação também se manifestam em aplicações práticas. Na computação clássica, as operações são altamente confiáveis e reproduzíveis, o que é ideal para tarefas cotidianas e processamento de informações comerciais. A computação quântica, por outro lado, é particularmente promissora para resolver problemas complexos em criptografia, simulação de moléculas e desenvolvimento de novos materiais, áreas onde os algoritmos quânticos podem superar significativamente o desempenho de algoritmos clássicos (BALL, 2018).

Empresas e centros de pesquisa, como a IBM e o *Google*, estão desenvolvendo computadores quânticos capazes de resolver problemas que ultrapassam as capacidades dos supercomputadores tradicionais. Um marco importante foi atingido em 2019, quando o Google anunciou ter alcançado a "supremacia quântica" ao resolver um problema específico que um supercomputador tradicional levaria milhares de anos para completar (ARUTE *et al*., 2019).

No que tange especificamente às comunicações quânticas, vale mencionar que estas são tecnologias que utilizam o entrelaçamento para transmitir informações de forma segura. Pois, diferente das comunicações convencionais, onde as mensagens podem ser interceptadas, nas comunicações quânticas a tentativa de espionagem altera o estado das partículas entrelaçadas, denunciando qualquer tentativa de invasão. Dessa forma, a presente tipologia supracitada tem o potencial de proteger sistemas governamentais e militares, garantindo que as informações transmitidas estejam livres de interceptações (PIRANDOLA *et al*., 2020).

No que concerne aos sensores quânticos, que têm uma precisão sem precedentes para medir campos magnéticos, gravidade e tempo, logo, há um enorme potencial a ser explorado em diversas áreas, inclusive a militar. Uma vez que, os sensores são baseados em efeitos quânticos podem revolucionar setores como a navegação e o monitoramento ambiental, principalmente em locais onde o *GPS* não funciona adequadamente, como em submarinos ou em missões espaciais. Além disso, tais sensores apresentam aplicações promissoras na defesa, permitindo a detecção de objetos a grandes distâncias e com alta precisão (DEGEN; REINHARD; CAPPELLARO, 2017).

Entretanto, apesar dos avanços, benefícios reais e do entusiasmo, as tecnologias quânticas ainda enfrentam dilemas e desafios consideráveis como já exposto. A manipulação de partículas quânticas requer condições extremamente controladas, como temperaturas muito próximas do zero absoluto, para evitar a decoerência, ou seja, a perda dos estados quânticos. A estabilidade dos sistemas quânticos é um problema técnico significativo que pesquisadores tentam contornar com diversas abordagens experimentais e teóricas (PRESKILL, 2018). Além dos desafios técnicos supracitados, também existem dilemas éticos e sociais que decorrem do desenvolvimento de tais tecnologias, que embora não sejam alvo desse trabalho, vale a pena mencionar, tais como: desigualdade tecnológica entre nações; possíveis impactos na segurança e privacidade, aumentando o desejo pela regulação e o controle estatal e a possibilidade de uso das tecnologias para fins nocivos.

Além disso, a corrida para dominar essas tecnologias também gera implicações geopolíticas, uma vez que, Estados Unidos, China e União Europeia investem bilhões de dólares em pesquisa e desenvolvimento quântico, com o intuito de alcançar a liderança em uma área que poderá redefinir a segurança e o equilíbrio de poder global (DIAS; SILVA; LIMA, 2021).

Como foi discutido até o presente momento, as tecnologias quânticas representam uma nova fronteira no desenvolvimento científico e tecnológico, com o potencial de transformar diversos setores, incluindo o segmento de defesa (KRELINA 2021; ARAÚJO-MOREIRA *et al.,* 2023). Embasadas nos princípios fundamentais da mecânica quântica, elas estão transformando o campo da ciência e oferecendo soluções inovadoras para problemas complexos. Embora ainda em estágio inicial e com desafios a superar, essas tecnologias abrem novas possibilidades para a ciência, a indústria e a defesa, representando um avanço com potencial de redefinir a fronteira tecnológica e as dinâmicas globais no século XXI.

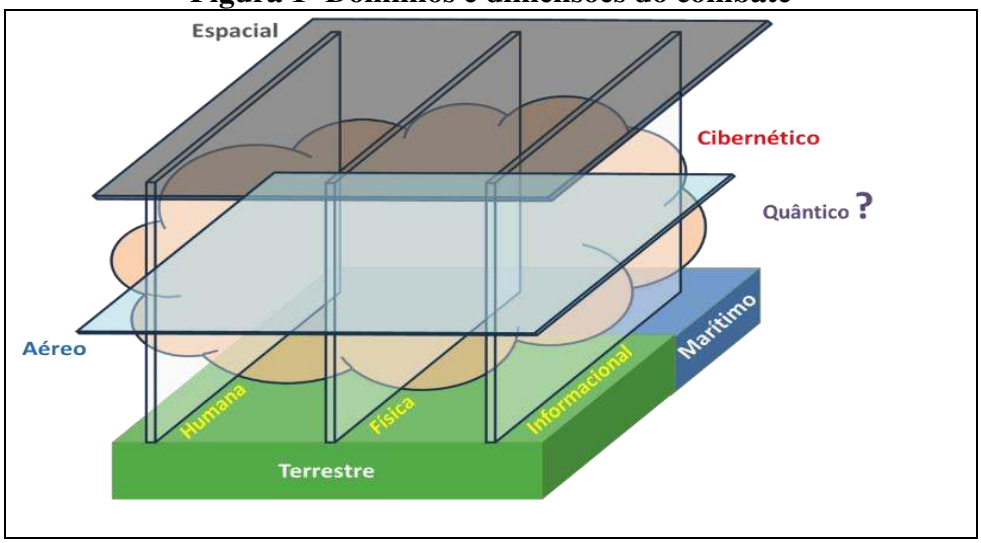
UTILIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS QUÂNTICAS NO SETOR DE DEFESA

As tecnologias quânticas estão se consolidando como uma área estratégica para a segurança e defesa nacional de diversas nações. Ao aproveitarem fenômenos da mecânica quântica, como

superposição, entrelaçamento e interferência, essas tecnologias prometem revolucionar a maneira como os países protegem suas infraestruturas, comunicam informações sensíveis e lidam com ameaças complexas. Países como os Estados Unidos da América, China e algumas nações europeias estão investindo maciçamente em pesquisas quânticas, com o intuito de obter vantagens tecnológicas que aumentem sua capacidade de defesa e segurança cibernética (NIELSEN; CHUANG, 2010).

Brito *et al* (2023) refletem sobre a possibilidade de um novo domínio da guerra, o quântico, conforme pode ser observado na Figura 1. Os autores supracitados argumentam que tem havido um debate contínuo, em nível político-estratégico, sobre como gerenciar recursos para este setor, a fim de gerar aplicações militares mais promissoras em tecnologia quântica.

Figura 1- Domínios e dimensões do combate



Fonte: Elaboração própria. Adaptada de United States (2022)

Conforme pode ser observado, a Figura 1 acima demonstra a integração de um possível "domínio quântico" aos já consolidados espaços de combate descritos no Manual de Operações do Exército Americano (FM 3-0) (UNITED STATES, 2022). Segundo Brito *et al*., (2023), essa inclusão reflete uma evolução conceitual do campo de guerra, impulsionada por avanços nas tecnologias quânticas que transcendem barreiras tradicionais. Nesse contexto, Krelina e Dubravcik (2023) reforçam que a computação quântica, sensores quânticos e criptografia quântica estão emergindo como ferramentas transversais, permeando os domínios terrestres, marítimos, aéreos, espaciais e cibernéticos, bem como as dimensões humana, física e informacional.

Essa transversalidade quântica transforma o paradigma da guerra, proporcionando capacidades como detecção ultrassensível de ameaças, comunicações seguras e análise de dados em velocidade exponencial, aspectos essenciais para o planejamento estratégico em ambientes complexos e multifacetados. Conforme argumentado por Nielsen e Chuang (2010), a revolução quântica estabelece

não apenas avanços técnicos, mas também desafios éticos e de governança, dada sua influência potencial na desestabilização de equilíbrios globais de poder.

É lícito afirmar que o domínio quântico emerge como desdobramento da guerra informacional, entendida como o uso estratégico da tecnologia para controle de dados, narrativas e fluxos informacionais (ARQUILLA; RONFELDT, 1997). Nesse contexto, ações como propaganda, desinformação e degradação da informação adversária visam comprometer a capacidade decisória do oponente (SILVA; GOMES FILHO, 2022).

Com os avanços em computação, criptografia e sensoriamento quântico, surgem novas assimetrias estratégicas. Ainda em consolidação, o domínio quântico já se projeta como elemento transformador da defesa, segurança e dissuasão tecnológica no cenário global.

Assim, a Figura 2 ilustra, de forma abrangente, o impacto das tecnologias quânticas nos diferentes aspectos da guerra moderna, consolidando a ideia de um cenário emergente denominado "guerra quântica".

Figura 2- Amplo espectro de emprego de tecnologias quânticas



Fonte: Krelina; Dúbřavčík (2023)

Como se observa, as tecnologias quânticas tendem a potencializar capacidades já existentes que são essenciais para as operações militares, integrando várias tecnologias e sistemas para otimizar a coleta e o uso de informações em tempo real (KRELINA; DUBRAVCIK, 2023; CHOI, 2023). De forma complementar, a figura 2 evidencia que o conceito de guerra quântica transcende os domínios tradicionais da guerra, como os descritos na Figura 1, ao integrar soluções quânticas capazes de ampliar significativamente as capacidades de detecção, comunicação e análise estratégica. As tecnologias de

radar e magnetometria quântica, por exemplo, prometem detectar aeronaves e submarinos de forma mais eficaz, enquanto a navegação inercial quântica elimina a dependência de sistemas *GPS*, que são vulneráveis a interferências e ataques cibernéticos.

Krelina e Dubravcik (2023) asseveram que as tecnologias quânticas estão revolucionando a defesa e para representar essa interação da quântica com o contexto militar, os autores utilizam o acrônimo C4ISR, que representa Comando, Controle, Comunicações, Computação, Inteligência, Vigilância e Reconhecimento. Estas são capacidades e sistemas cujo foco principal é garantir a comunicação e a tomada de decisões eficazes.

Por outro lado, no artigo "*Quantum Technology and the Military—Revolution or Hype?: The Impact of Emerging Quantum Technologies on Future Warfare*," Choi (2023), questiona se essas inovações representam uma mudança paradigmática ou se ainda enfrentam barreiras significativas, como limitações técnicas, altos custos de implementação e a necessidade de maior maturidade tecnológica. Nesse trabalho, além de discutir sobre desafios práticos, como a viabilidade técnica, os custos e as limitações atuais, Choi (2023) argumenta que, embora promissoras, essas tecnologias ainda estão longe de transformar fundamentalmente o campo de batalha.

Independente da abordagem otimista ou realista é fato que as tecnologias quânticas estão no cerne das discussões de caráter estratégico provocando, segundo alertam um aumento de riscos de uma corrida tecnológica global. Dessa forma, é preciso intensificar a colaboração entre governos e indústrias para explorar ao máximo essas tecnologias disruptivas (KRELINA; DUBRAVCIK, 2023),

Neste sentido, um dos maiores avanços proporcionados pela física quântica está na criptografia quântica, mais especificamente na Distribuição Quântica de Chaves (DQC). Essa tecnologia permite que duas partes compartilhem uma chave criptográfica de forma segura, detectando imediatamente qualquer tentativa de interceptação. Como resultado, a DQC pode ser usada para proteger comunicações governamentais e militares contra-ataques de espionagem e garantir a integridade dos dados trocados entre bases militares e centros de comando (DODA *et al*., 2021). Este tipo de comunicação criptograficamente segura, viável apenas por meio das tecnologias quânticas, pode ser particularmente útil em operações de inteligência, onde a confidencialidade das informações é primordial.

A computação quântica desponta como ferramenta estratégica na defesa por sua capacidade de resolver problemas complexos rapidamente. O algoritmo de Shor ameaça sistemas criptográficos como o RSA, que se baseia na dificuldade de fatoração de grandes primos (SHOR, 1997; STINSON, 2006).

Com essa vulnerabilidade, países que dominarem tal tecnologia poderão quebrar códigos tradicionais e desenvolver criptografia resistente à era quântica (BURRELL, 2018).

Nesse sentido cabe destacar aqui o sensoriamento quântico, que é outra aplicação promissora. Uma vez que, sensores quânticos podem detectar com extrema precisão variações em campos magnéticos, gravitacionais e elétricos, o que facilita a localização e monitoramento de submarinos ou aeronaves inimigas sem o uso de *GPS*. Além disso, sensores quânticos podem ser utilizados para detectar movimentações subterrâneas e outros fenômenos de interesse militar, oferecendo uma vantagem estratégica em cenários de conflito, onde informações geoespaciais precisas são essenciais (BALL, 2018). O uso de sensores quânticos em operações de defesa aumentará a precisão na identificação de ameaças e possibilita tomadas de decisão mais informadas e rápidas. A China já vem testando radar quântico para detectar a presença de alvos furtivos em áreas amplas, como submarinos ou aeronaves em movimento rápido, que alteram o campo gravitacional ao seu redor.

A comunicação quântica via satélite também é uma área de intenso desenvolvimento, especialmente na China. Em 2016, o país lançou o satélite *Micius*, que realiza comunicações seguras entre estações terrestres por meio de DQC, servindo como um exemplo de como tecnologias quânticas podem ser implementadas em sistemas de comunicação de longo alcance (VALLONE *et al*., 2015). Em um cenário de Guerra Cibernética, onde ataques a infraestruturas de comunicação são comuns, as comunicações quânticas podem fornecer uma rede de comunicação resiliente e praticamente impenetrável para transmissões militares. Essa segurança adicional é particularmente relevante em contextos em que uma falha de comunicação pode comprometer toda uma operação.

As tecnologias quânticas podem redefinir a superioridade no campo de batalha. Por essa razão, o investimento no setor de defesa tem sido incentivado por governos ao redor do mundo, por meio da criação de programas e fundos específicos para pesquisas na área. Nos Estados Unidos, por exemplo, o *National Quantum Initiative Act*, sancionado em 2018, fornece recursos para pesquisa em tecnologias quânticas, com o objetivo de manter a liderança tecnológica do país e enfrentar possíveis ameaças de estados rivais que também estão desenvolvendo essa tecnologia (CONGRESS OF THE UNITED STATES, 2018). Esse tipo de iniciativa amplia a percepção de que o domínio das tecnologias quânticas pode conferir uma vantagem estratégica significativa no cenário global, colocando a segurança e a defesa nacional como prioridades na agenda de desenvolvimento tecnológico.

A própria corrida pela supremacia quântica no meio civil reflete não só a dualidade dessas tecnologias, mas uma busca por avanços científicos, capazes de auferir uma vantagem estratégica, onde a tecnologia se torna uma ferramenta de poder e influência no cenário internacional.

Por outro lado, como já foi destacado, a adoção dessas tecnologias não é tarefa simples e enfrenta desafios significativos (SCHLOSSHAUER, 2007; KRELINA; DUBRAVCIK, 2023; CHOI,

2023). Além disso, a sensibilidade dos sistemas quânticos ao ruído ambiental e a dificuldade de fabricação em escala são barreiras a serem superadas.

No entanto, com o contínuo avanço da pesquisa e desenvolvimento, é lícito supor que essas limitações possam ser minimizadas nos próximos anos.

METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada no método de estudo de caso múltiplo comparativo conforme Yin (2014), combinando revisão bibliográfica sistemática e análise de cenários prospectivos. O estudo foca nas estratégias de desenvolvimento de tecnologias quânticas dos Estados Unidos, China e União Europeia, com o objetivo de identificar padrões estratégicos, avaliar políticas e investimentos e analisar implicações para países em desenvolvimento como o Brasil. A opção por uma abordagem qualitativa justifica-se pela complexidade e natureza multidisciplinar do tema, que envolve física quântica, defesa, geopolítica e políticas públicas de ciência e tecnologia. O método de estudo de caso é particularmente indicado para investigar fenômenos contemporâneos inseridos em contextos reais, cujos limites não são claramente definidos. Estudos recentes validam essa abordagem, como Krelina (2021), que mapeia aplicações militares de tecnologias quânticas, Ambrosius (2023), que analisa políticas espaciais quânticas, e Yan (2022), que compara estratégias nacionais de desenvolvimento quântico.

A coleta de dados foi exclusivamente documental e secundária, com base em três categorias principais: documentos científicos (artigos indexados, *proceedings* e livros técnicos), documentos estratégicos (relatórios de agências governamentais e planos nacionais de desenvolvimento tecnológico) e documentos institucionais (publicações de organizações internacionais, think tanks e empresas líderes em tecnologia quântica). Foram priorizadas fontes dos últimos dez anos, especialmente dos últimos cinco, com credibilidade acadêmica ou institucional reconhecida. Foram excluídas fontes sem revisão por pares, material promocional, publicações com viés ideológico explícito ou que abordassem apenas aspectos técnicos sem contexto estratégico. Os dados foram analisados por meio de análise de conteúdo temática, com cinco categorias analíticas: fundamentos científicos e tecnológicos, aplicações militares, estratégias nacionais, dimensões geopolíticas e implicações para o Brasil. A análise comparativa considerou investimentos, estruturas de governança, prioridades tecnológicas, parcerias estratégicas e cronogramas de desenvolvimento.

A triangulação de fontes, a validação por especialistas e a transparência metodológica garantiram a qualidade das evidências (ABDALLA *et al*, 2018). A metodologia foi inspirada em abordagens

consolidadas como a de Krelina (2021), que combina revisão documental e estudo de caso, Ambrosius (2023), que aplica análise comparativa a políticas espaciais quânticas, Rosch-Grace e Straub (2022), que trabalham com cenários prospectivos, e Lim (2025), que reafirma a adequação da abordagem qualitativa em estudos emergentes e complexos.

DISPUTAS GEOPOLÍTICAS E A CORRIDA TECNOLÓGICA

A busca incessante por parte dos Estados pela conquista e manutenção de sua supremacia militar, faz com que haja uma busca pelo domínio de Tecnologias Quânticas. Krelina (2021) assevera que há a possibilidade real da existência de conflitos bélicos baseados no emprego de tecnologias quânticas (TQ). O argumento central é o de que tais tecnologias, quando aplicadas em teatro de operações militares, afetariam diretamente as capacidades de inteligência, segurança e defesa, em todos os domínios da guerra.

Sob esse argumento, é indispensável caracterizar um ataque quântico é quando se utiliza a TQ para quebrar, interromper, ou escutar os sistemas de segurança quer seja clássico ou quântico.

Há vários atores internacionais que estão buscando investir fortemente em TQ. Um exemplo disso, é a China que recentemente reconheceu o valor estratégico desse tema e como isso pode ser visto como uma vantagem decisiva perante as demais nações.

De igual forma, para União Europeia (UE) essa é uma tecnologia de extrema importância e que pode ser utilizada no setor de defesa e segurança. Da mesma forma, para os países são membros da Organização do Atlântico Norte (OTAN), esse tema possui um grande desafio tecnológico. A seguir, serão trazidos a lume aspectos relacionados à forma como EUA, China, União Europeia e OTAN estão tratando dessa temática em âmbitos nacionais, regionais e em blocos.

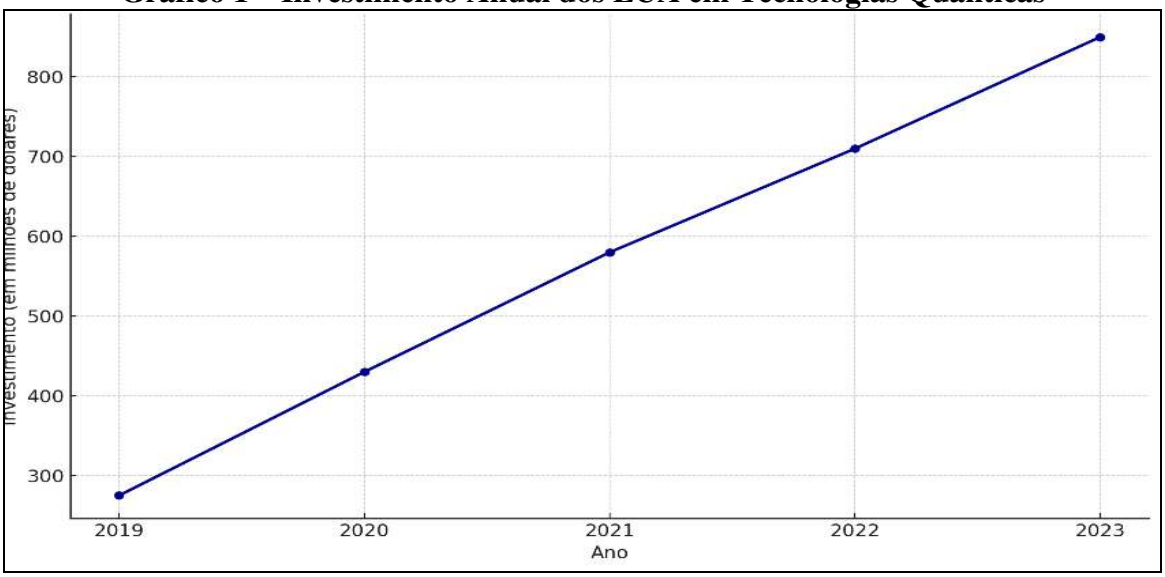
Aspectos relativos aos EUA

Os Estados Unidos estão na vanguarda do desenvolvimento e aplicação de tecnologias quânticas, considerando-as um pilar estratégico para a defesa nacional. O investimento em tecnologias quânticas pelos Estados Unidos reflete uma estratégia ampla e integrada, envolvendo o governo, instituições acadêmicas e empresas privadas. A aprovação da *National Quantum Initiative Act* em 2018 destinou US$ 1,2 bilhão ao desenvolvimento de tecnologias quânticas ao longo de cinco anos, buscando consolidar a liderança do país nesse campo estratégico (MONROE; KIM, 2019). Programas como o *Quantum Economic Development Consortium* (QED-C) foram criados para promover a colaboração

entre setores e acelerar o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis à defesa e segurança nacional, fomentando o crescimento da indústria quântica nos EUA (BURRELL, 2018).

O gráfico 1 abaixo demonstra os investimentos anuais dos EUA em tecnologias quânticas de forma geral, desde o ano de 2019 até 2023.

Gráfico 1 – Investimento Anual dos EUA em Tecnologias Quânticas



Fonte: United States (2022).

O gráfico mostra a evolução dos investimentos públicos dos Estados Unidos em tecnologias quânticas, no contexto da implementação da *National Quantum Initiative* (NQI), sancionada em 2018. De acordo com o relatório *do Congressional Research Service* (O'ROURKE, 2020), a NQI foi criada com o objetivo de impulsionar a pesquisa quântica básica e aplicada, com foco em manter a liderança tecnológica dos EUA frente à competição global, especialmente com a China.

Conforme exposto por Kania (2020), o investimento federal em tecnologias quânticas passou de US$ 275 milhões em 2019 para cerca de US$ 850 milhões em 2023, refletindo o reconhecimento da computação, comunicação e sensoriamento quânticos como áreas de interesse estratégico nacional. Tal crescimento é influenciado por legislações como o *National Quantum Initiative Act* e o *CHIPS and Science Act*, que preveem não apenas financiamento direto, mas também a articulação entre universidades, laboratórios federais e o setor privado.

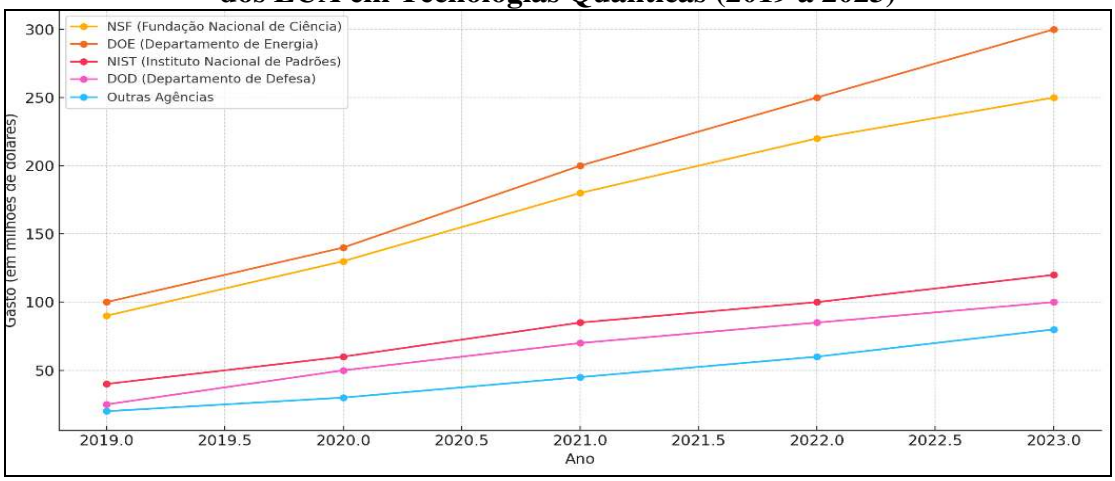
Além disso, como destacam Yelin *et al*. (2022), o financiamento crescente demonstra uma tentativa dos EUA de criar um ecossistema de inovação quântica robusto, garantindo não apenas avanços científicos, mas também soberania tecnológica e aplicações de defesa em longo prazo.

Ou seja, fica nítido que as parcerias público-privadas têm desempenhado um papel essencial nesse contexto. A interação entre instituições acadêmicas e o setor empresarial, exemplificada por

contratos estratégicos entre empresas como a IonQ e o governo norte-americano, busca desenvolver aplicações de vanguarda, como redes quânticas para comunicação segura e sistemas de navegação independentes de GPS (WENDIN, 2017). A criação de centros de pesquisa especializados, como o *Quantum Information Science Research Center*, intensifica os esforços para explorar aplicações militares e civis das tecnologias quânticas, incluindo criptografia avançada e sistemas de sensoriamento (BENNETT; BRASSARD, 2014).

De forma complementar, para compreender para além de investimento do país é necessário compreender os gastos por agência em TQ desde 2019 até o ano de 2023.

Gráfico 2 – Gastos por Agência Federal dos EUA em Tecnologias Quânticas (2019 a 2023)



Fonte: United States (2022).

O investimento dos Estados Unidos em tecnologias quânticas tem crescido de forma significativa desde a promulgação da *National Quantum Initiative Act* em 2018, que marcou o início de uma política científica coordenada e robusta voltada ao fortalecimento da soberania tecnológica do país. A referida legislação destinou, inicialmente, mais de 1,2 bilhão de dólares para o período de 2019 a 2023, visando à consolidação de uma rede nacional de pesquisa e desenvolvimento em informação quântica, coordenada entre as principais agências federais: a Fundação Nacional de Ciência (NSF), o Departamento de Energia (DOE) e o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST), com participação ativa do Departamento de Defesa (DOD) e de outras agências estratégicas (O'ROURKE, 2020).

Entre os anos de 2019 e 2023, os gastos federais com tecnologias quânticas demonstram uma curva de crescimento contínua, tanto em volume de recursos quanto em amplitude institucional. A Fundação Nacional de Ciência (NSF), responsável por liderar a pesquisa básica na área, aumentou seus investimentos de aproximadamente 90 milhões de dólares em 2019 para cerca de 250 milhões em 2023.

Esse aumento permitiu o fortalecimento de programas estruturantes, como os *Quantum Leap Challenge Institutes*, voltados à criação de núcleos interdisciplinares de excelência em computação, simulação e algoritmos quânticos (YELIN *et al*., 2022).

Paralelamente, o Departamento de Energia, que coordena importantes centros nacionais de pesquisa aplicada, ampliou sua participação financeira de 100 milhões para aproximadamente 300 milhões de dólares no mesmo período. O DOE tem investido especialmente na construção de hardwares quânticos escaláveis, desenvolvimento de novos materiais e simulações de sistemas complexos, contribuindo com uma infraestrutura científica avançada e estratégica para o país (KANIA, 2020).

O NIST também registrou crescimento expressivo em seus aportes, saltando de 40 milhões para cerca de 120 milhões de dólares entre 2019 e 2023. Como destaca o próprio NIST (2023), sua atuação está centrada na criação de padrões, protocolos e métricas de desempenho que assegurem a interoperabilidade, confiabilidade e segurança das tecnologias quânticas em escala nacional e internacional.

O DOD, por sua vez, triplicou seus investimentos, passando de 25 milhões em 2019 para aproximadamente 100 milhões em 2023, com foco na aplicação militar e estratégica das tecnologias quânticas. Dentre os principais interesses do setor de defesa, destacam-se os sistemas de criptografia quântica, sensores de alta precisão para ambientes hostis e a computação quântica aplicada a simulações táticas e análise de dados de inteligência (O'ROURKE, 2020).

Além dessas instituições, outras agências como NASA, NIH, NSA e DHS também aumentaram seus investimentos, partindo de um patamar de 20 milhões em 2019 para cerca de 80 milhões em 2023, o que evidencia o caráter transversal das tecnologias quânticas, com aplicações que vão desde a saúde e a biotecnologia até a segurança espacial e nacional.

Segundo Yelin *et al*. (2022), esse padrão de crescimento demonstra não apenas o reconhecimento da importância estratégica das tecnologias quânticas para a liderança científica e tecnológica dos Estados Unidos, mas também o amadurecimento de um ecossistema de inovação orientado para resultados concretos em ciência, economia e defesa. A estruturação dos gastos por agência revela uma política pública orientada à integração entre pesquisa básica, desenvolvimento tecnológico e segurança nacional, consolidando os EUA como uma das principais potências na chamada Revolução Quântica 2.0.

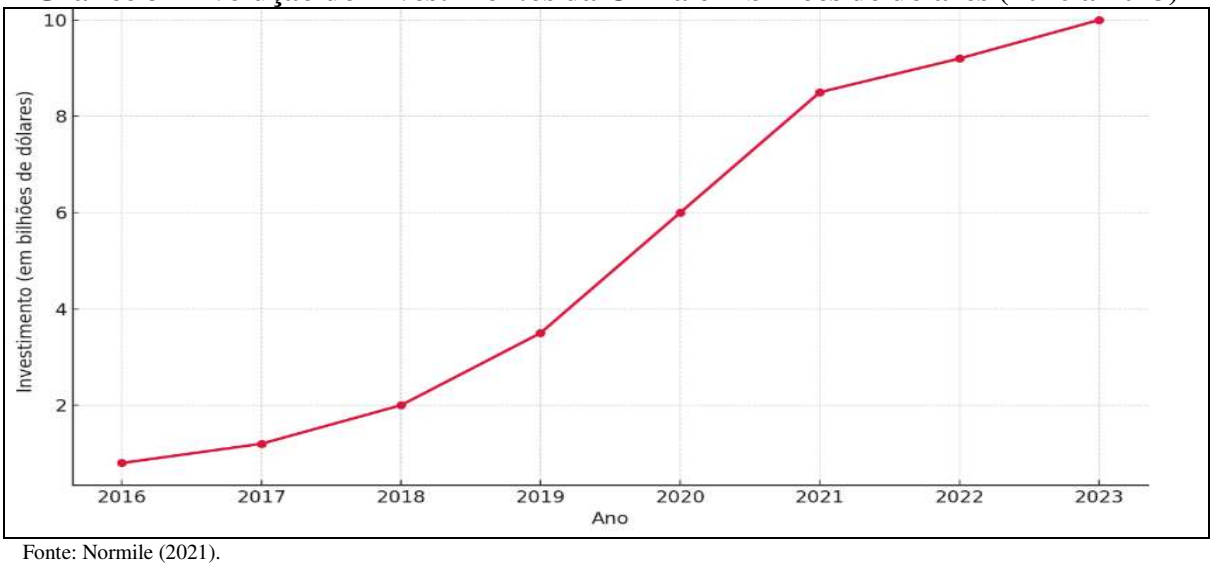
Em suma, esses investimentos conjuntos reafirmam o compromisso dos Estados Unidos em liderar o desenvolvimento de tecnologias quânticas, posicionando o país na vanguarda da inovação tecnológica global e fortalecendo sua capacidade de enfrentar desafios estratégicos no século XXI.

Para superar esses desafios apontados na sessão 3, os Estados Unidos da América estão investindo em pesquisas para tornar essas tecnologias mais robustas e adaptáveis às condições adversas do uso militar. Neste sentido, buscam formar profissionais especializados para lidar com as tecnologias quânticas. Instituições de ensino superior americanas estão criando programas em ciência e tecnologia quântica para capacitar a próxima geração de engenheiros e cientistas a desenvolver e operar sistemas quânticos avançados. O governo americano tem incentivado essas iniciativas, visando não apenas ao desenvolvimento tecnológico, mas também à criação de uma força de trabalho qualificada que possa sustentar a liderança dos EUA na área (CONGRESS OF THE UNITED STATES, 2018).

Aspectos relativos à China

A China desponta como uma das lideranças globais no desenvolvimento e aplicação de tecnologias quânticas, especialmente no setor de defesa nacional. O investimento estratégico reflete a visão do país em consolidar sua posição como potência tecnológica e militar. Conforme apontam Li *et al*. (2020), o governo chinês tem investido bilhões de dólares em pesquisa e infraestrutura para tecnologias quânticas, incluindo comunicações seguras, radares avançados e sensores de alta precisão.

Gráfico 3 - Evolução do Investimentos da China em bilhões de dólares (2016 a 2023)



Fonte: Normile (2021).

O gráfico apresentado ilustra a evolução dos investimentos realizados pela China no setor de tecnologias quânticas entre os anos de 2016 e 2023. Os valores, estimados com base em fontes científicas e jornalísticas internacionais, como *Nature* (NORMILE, 2021) e South China Morning Post (2021), apontam um crescimento exponencial, passando de cerca de US$ 0,8 bilhão em 2016 para

aproximadamente US$ 10 bilhões em 2023. Este aumento expressivo reflete não apenas a intensificação do compromisso estatal chinês com a liderança em tecnologias emergentes, mas também a consolidação de uma estratégia nacional de soberania tecnológica e superioridade militar.

Segundo Li *et al*. (2020), o governo chinês tem concentrado esforços em áreas de alto impacto, como comunicação quântica segura, computação quântica de alto desempenho, e sensoriamento quântico de precisão, com aplicações diretas na segurança nacional. A iniciativa mais emblemática dessa trajetória foi o lançamento do satélite *Micius*, em 2016, considerado o primeiro satélite de comunicação quântica do mundo, que utilizou emaranhamento fotônico para realizar transmissões criptografadas entre estações terrestres distantes (VALLONE *et al*., 2015).

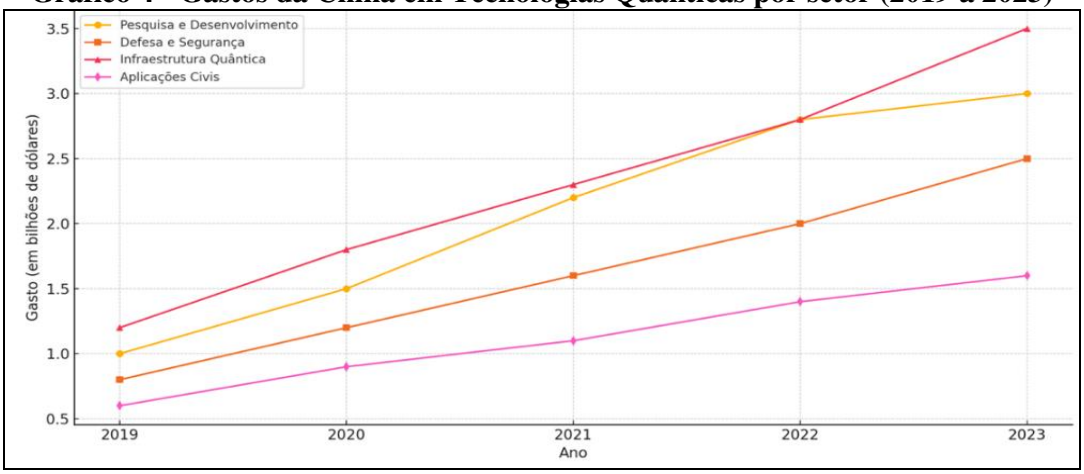
A construção do Laboratório Nacional de Ciências da Informação Quântica, inaugurado em Hefei, representa o principal marco em termos de investimento. Segundo Normile (2021), trata-se de um dos maiores centros de pesquisa do mundo nessa área, com orçamento estimado em US$ 10 bilhões — valor superior ao total investido por qualquer outro país até então. Essa iniciativa faz parte de um plano estratégico mais amplo, vinculado ao 13º Plano Quinquenal da China, que prioriza a independência tecnológica em áreas críticas para a competitividade global.

Além disso, conforme observado por Wang e Zhang (2022), a China tem buscado integrar redes de comunicação quântica terrestres e espaciais, criando uma infraestrutura nacional de grande escala, com aplicações tanto civis quanto militares. Outro ponto relevante é o desenvolvimento de radares quânticos, como os anunciados pela *China Electronics Technology Group Corporation* (CETC), capazes de detectar aeronaves furtivas e drones a distâncias superiores a 100 km, utilizando princípios de emaranhamento e superposição (ZHOU; LI, 2018).

Esses avanços são reforçados por um ecossistema de inovação que inclui centros de pesquisa especializados, empresas privadas e universidades de elite. De acordo com Chen e Zhang (2019), a China tem buscado converter seu investimento em vantagens estratégicas reais, apostando em tecnologias quânticas para reconfigurar os paradigmas da guerra eletrônica, da inteligência artificial e da vigilância espacial.

Portanto, o gráfico evidencia não apenas o volume dos recursos aplicados, mas também a intencionalidade política e estratégica que sustenta o projeto tecnológico quântico da China. O país não apenas participa da corrida tecnológica global, mas busca deliberadamente liderar essa nova fase da revolução científico-tecnológica, desafiando a supremacia histórica dos Estados Unidos no setor.

Gráfico 4 - Gastos da China em Tecnologias Quânticas por setor (2019 a 2023)



Fonte: Normile (2021).

O gráfico apresentado demonstra a evolução estimada dos gastos da China em tecnologias quânticas por setor entre os anos de 2019 e 2023, indicando uma estratégia nacional pautada na diversificação e expansão progressiva do investimento. Destacam-se quatro áreas principais: pesquisa e desenvolvimento (P&D), defesa e segurança, infraestrutura quântica e aplicações civis. O setor de P&D aparece como o principal destinatário de recursos, refletindo o esforço chinês em consolidar uma base científica robusta e em acelerar a produção de conhecimento, patentes e tecnologias proprietárias.

O setor de infraestrutura quântica também recebeu atenção significativa no período analisado, com crescimento visível a partir de 2020, impulsionado pela construção do Laboratório Nacional de Ciências da Informação Quântica, situado em Hefei, com investimento estimado de US$ 10 bilhões (NORMILE, 2021). Essa instalação é descrita como a maior do mundo dedicada exclusivamente às tecnologias quânticas e está no centro de uma rede de institutos e centros de excelência, integrando iniciativas públicas, acadêmicas e privadas. Esse investimento se alinha ao objetivo do Partido Comunista Chinês de alcançar autossuficiência em tecnologias críticas, como destacado por Wang e Zhang (2022), os quais ressaltam que a integração de infraestrutura terrestre e espacial tem potencial para sustentar comunicações ultra seguras e computação distribuída em escala nacional.

Em paralelo, os gastos em defesa e segurança nacional cresceram de forma constante, revelando o caráter dual das tecnologias quânticas e sua importância estratégica no contexto geopolítico contemporâneo. A China tem investido em radares quânticos, criptografia baseada em emaranhamento quântico e sensores de altíssima precisão, capazes de operar sem a dependência de sinais de GPS — o que representa uma vantagem significativa em ambientes hostis ou de guerra eletrônica (CHEN; YANG; ZAO, 2013). Os investimentos em aplicações civis também evoluíram, com destaque para redes de comunicação quântica segura e possíveis aplicações em diagnósticos médicos e simulações complexas. Esses dados indicam que o país não apenas busca a supremacia tecnológica, mas também pretende

consolidar sua influência política, econômica e militar por meio do domínio das tecnologias quânticas, redesenhando o equilíbrio global de poder no século XXI.

A China tem se destacado no desenvolvimento de radares quânticos, utilizando propriedades como a superposição e o emaranhamento para detectar aeronaves furtivas e drones, considerados invisíveis aos radares convencionais. Em 2016, *China Electronics Technology Group Corporation* (CETC) anunciou o desenvolvimento de um protótipo de radar quântico capaz de detectar objetos a uma distância de até 100 km, explorando o emaranhamento fotônico para aumentar a precisão e a sensibilidade (ZHOU; LI, 2018). Esses sistemas são projetados para superar limitações dos radares tradicionais, oferecendo maior eficácia na identificação de alvos *stealth*, como o caça F-35 Além disso, a China realizou testes práticos em ambientes controlados para validar a eficácia dessa tecnologia, consolidando seu papel como pioneira no uso de sensoriamento quântico no campo militar. Esses esforços integram uma estratégia nacional de ampliação das capacidades tecnológicas voltadas à segurança e defesa, alinhando-se à busca pela liderança global na era das tecnologias quânticas (CHEN; YANG; ZAO, 2013). Segundo Chen *et al*. (2021), esses sistemas oferecem maior sensibilidade e alcance, representando uma vantagem estratégica em cenários de combate.

Ademais, os avanços em sensores quânticos permitem medições extremamente precisas de campos gravitacionais e magnéticos, sendo úteis tanto para navegação submarina quanto para detectar objetos no espaço. Esses dispositivos não dependem de sinais de *GPS*, tornando-os ideais para operações em ambientes onde os sistemas de navegação tradicionais estão comprometidos (SUN; LIU, 2020).

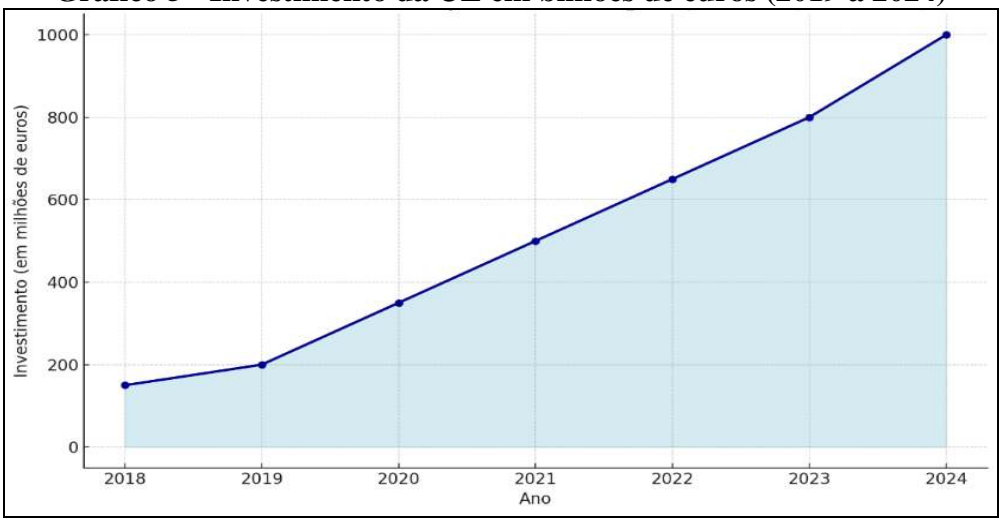
O empenho da China em dominar essas tecnologias não se limita ao investimento financeiro. Instituições acadêmicas, empresas privadas e órgãos governamentais trabalham de forma coordenada. Zeng e Huang (2021) destacam a formação de centros de pesquisa dedicados, como o Laboratório Nacional de Ciências da Informação Quântica, projetado para liderar inovações nesse campo.

Em síntese, a China tem utilizado a tecnologia quântica para transformar sua defesa nacional, combinando o desenvolvimento de sistemas como radares quânticos de longo alcance, capazes de detectar aeronaves furtivas, com uma estratégia nacional que integra pesquisa científica avançada e objetivos políticos de longo prazo. A implementação de tecnologias como o radar quântico desenvolvido pela CETC, com alcance estimado de 100 km, reflete não apenas a busca por segurança interna, mas também uma clara intenção de obter vantagem estratégica no cenário global (ZHOU; LI, 2018). Esses avanços, além de fortalecerem a defesa militar, demonstram o potencial da China em moldar novos paradigmas tecnológicos, com impactos significativos nas esferas econômica, política e tecnológica que irão influenciar profundamente o século XXI (CHEN; YANG; ZAO, 2013).

UNIÃO EUROPEIA

A União Europeia (UE) tem investido de maneira estratégica no desenvolvimento de tecnologias quânticas para reforçar sua defesa e segurança. Em um cenário de crescente complexidade global, a UE busca fortalecer sua autonomia tecnológica e consolidar a posição de liderança em inovação, priorizando áreas como comunicação segura, detecção avançada e sensores de alta precisão. Segundo Ertl *et al*. (2021), a Iniciativa de Tecnologias Quânticas da UE, lançada em 2018, representa um marco importante, unindo esforços de pesquisa em toda a região.

Gráfico 5 - Investimento da UE em bilhões de euros (2019 a 2024)



Fonte: European Commission (2024).

O gráfico apresentado reflete o crescimento progressivo dos investimentos da União Europeia em tecnologias quânticas no período de 2018 a 2024, evidenciando um esforço coordenado para transformar a excelência científica europeia em liderança tecnológica. A trajetória ascendente é impulsionada pela criação da *Quantum Technologies Flagship*, iniciativa lançada pela Comissão Europeia em 2018 com um orçamento de €1 bilhão para dez anos, voltada à transição da ciência fundamental para aplicações industriais e estratégicas (EUROPEAN COMMISSION, 2018). Programas complementares, como o *Horizon Europe* e o *Digital Europe*, também reforçam esse movimento, alocando centenas de milhões de euros para acelerar o desenvolvimento de aplicações práticas e infraestrutura digital baseada em tecnologia quântica.

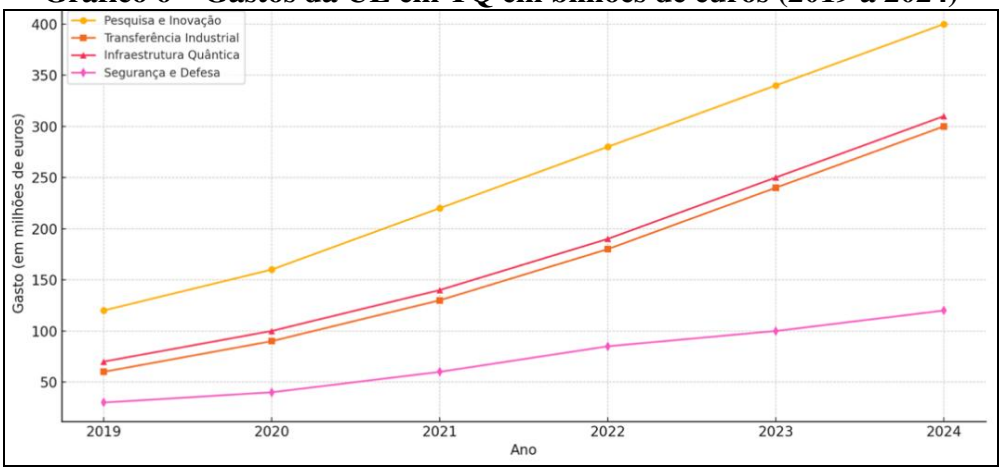
Além do investimento direto por meio de programas comunitários, a UE vem adotando medidas políticas para fortalecer sua competitividade no cenário global. Em 2023, os Estados-Membros assinaram a Declaração Europeia sobre Tecnologias Quânticas, reconhecendo a importância estratégica dessas tecnologias e se comprometendo a desenvolver um ecossistema europeu de inovação quântica

(EUROPEAN COMMISSION, 2023). Essa política visa enfrentar os desafios da fragmentação regulatória, da escassez de investimento privado e da competição com potências como China, que possuem estratégias mais centralizadas e volumes de recursos significativamente maiores.

A partir de 2024, destaca-se o aumento expressivo de recursos alocados no setor de semicondutores quânticos, com destaque para os €65 milhões disponibilizados no âmbito do programa *Chips Joint Undertaking*, que financia a integração de circuitos quânticos e dispositivos avançados (APDC, 2024). Assim, o gráfico 5 não apenas revela o compromisso financeiro crescente da UE, mas também evidencia uma virada estratégica, em que a União busca posicionar-se como uma potência quântica global, transformando investimentos públicos em capacidades industriais e tecnológicas que sustentem sua autonomia estratégica no século XXI.

O gráfico 6 abaixo demonstra os gastos da UE em TQ em bilhões de euros entre os anos de 2019–2024.

Gráfico 6 – Gastos da UE em TQ em bilhões de euros (2019 a 2024)



Fonte: European Commission (2024).

O gráfico apresentado evidencia a distribuição estimada dos gastos da UE em tecnologias quânticas ao longo do período de 2019 a 2024, classificados em quatro grandes eixos estratégicos: pesquisa e inovação, transferência para a indústria, infraestrutura quântica e segurança e defesa. O setor de pesquisa e inovação destaca-se como o principal foco de investimento ao longo dos anos, refletindo o objetivo da UE de consolidar sua excelência científica como base para o avanço tecnológico. Esse direcionamento está alinhado com o *Quantum Technologies Flagship*, programa iniciado em 2018 com orçamento de €1 bilhão, voltado à construção de um ecossistema europeu competitivo e integrador no campo quântico (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

Os investimentos em infraestrutura quântica e transferência industrial também apresentam crescimento constante, demonstrando o esforço da UE em transformar descobertas científicas em

soluções práticas para setores estratégicos, como telecomunicações, computação e semicondutores. Por fim, o crescimento dos gastos em segurança e defesa reflete a mudança de postura da União Europeia em relação ao papel das tecnologias emergentes na geopolítica contemporânea. A Declaração Europeia sobre Tecnologias Quânticas, assinada em 2023 pelos Estados-Membros, reconhece a importância dessas tecnologias para a soberania digital e para a segurança nacional, estimulando sua integração em sistemas de comunicação criptografada, sensoriamento avançado e navegação autônoma (EUROPEAN COMMISSION, 2023).

Uma das principais apostas europeias para o setor de defesa está na comunicação quântica segura, utilizando criptografia baseada em distribuição de chaves quânticas. De acordo com Keller e Meyer (2020), a UE tem trabalhado em um sistema integrado de redes quânticas terrestres e espaciais, o *European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)*, projetado para ser resiliente contra ciberataques, inclusive os que poderiam ser realizados por computadores quânticos.

Outro destaque é o desenvolvimento de radares quânticos para aplicações militares, que oferecem maior capacidade de detecção, mesmo em situações de baixa visibilidade ou diante de tecnologias furtivas, como aeronaves *Stealth*. García e Schmidt (2022) apontam que esses radares representam uma mudança de paradigma, permitindo à UE competir em igualdade com outras potências, como Estados Unidos e China, no cenário de defesa tecnológica.

Além disso, os avanços da UE em sensores quânticos trazem benefícios significativos para a navegação e a detecção de submarinos em águas profundas. Esses sensores, que utilizam fenômenos como o tunelamento e a superposição quântica, não dependem de sistemas de *GPS*, o que os torna altamente eficazes em ambientes hostis ou em missões de sigilo (NOVAK *et al*., 2021). Para viabilizar esses avanços, a UE aposta em colaboração internacional e integração entre setores acadêmico, industrial e governamental. Segundo Dupont e Lefèvre (2022), programas como o *Horizon Europe* têm financiado projetos inovadores que conectam países membros, promovendo o compartilhamento de conhecimentos e infraestrutura. Essa abordagem colaborativa é vista como essencial para enfrentar desafios como a escassez de especialistas e a alta complexidade das tecnologias quânticas.

Entretanto, assim como EUA e China, a União Europeia também enfrenta obstáculos. A competição global em tecnologia quântica é acirrada, especialmente com os Estados Unidos e a China avançando rapidamente. Apesar disso, os esforços da UE indicam um compromisso com a soberania tecnológica e com a construção de capacidades que garantam sua segurança e competitividade.

Em resumo, o investimento em tecnologias quânticas pela União Europeia reflete a necessidade de preparar-se para ameaças emergentes, ao mesmo tempo em que solidifica seu papel como líder global

em inovação. Com iniciativas de longo prazo, como o *EuroQCI*, a UE demonstra que está comprometida em alinhar avanços científicos à construção de uma defesa mais segura e independente.

CORRIDA TECNOLÓGICA: IMPLICAÇÕES PARA A DEFESA DO BRASIL

O avanço das tecnologias quânticas em nível global, traz importantes reflexões para a defesa do Brasil. Apesar de ser um campo ainda emergente, a ciência quântica apresenta um potencial disruptivo significativo, com aplicações que vão desde a comunicação segura até sistemas avançados de navegação e detecção, capazes de alterar profundamente a dinâmica da segurança nacional.

Uma das principais implicações para o Brasil está relacionada à necessidade de investir em infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento. Conforme apontam Barbosa e Souza (2022), o domínio de tecnologias como criptografia quântica e sensores avançados é essencial para garantir a proteção de informações estratégicas e a segurança de fronteiras. Diante da crescente digitalização de sistemas de defesa, a vulnerabilidade a ciberataques aumenta, e a criptografia quântica oferece um meio de mitigar tais riscos, estabelecendo comunicações praticamente invioláveis.

Além disso, os avanços em radares quânticos podem ter impactos diretos na vigilância de territórios extensos, como a Amazônia, onde a detecção de aeronaves não autorizadas e drones representa um desafio constante. Segundo Oliveira e Pereira (2023), radares baseados em superposição quântica poderiam aumentar a eficiência na identificação de ameaças em regiões de difícil acesso, contribuindo para a soberania do país.

Outra área estratégica está nos sensores quânticos, que possuem aplicações relevantes na navegação submarina, especialmente para a proteção da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) brasileira. Com vastos recursos naturais, incluindo o pré-sal, o Brasil depende de tecnologias avançadas para monitorar e proteger suas águas territoriais. Nesse contexto, sensores que operam independentemente de *GPS* podem ser fundamentais para operações militares e de vigilância marítima (FERREIRA; LIMA, 2021).

Ainda assim, o Brasil enfrenta desafios significativos para integrar essas tecnologias em suas estratégias de defesa. A falta de financiamento contínuo e a dependência de tecnologias estrangeiras limitam a capacidade do país de competir com outras nações. Além disso, a formação de especialistas e o fortalecimento de parcerias entre universidades, empresas e instituições militares são aspectos críticos que ainda demandam maior atenção (SANTOS *et al*., 2020).

Nesse cenário, parcerias internacionais podem desempenhar um papel fundamental. A cooperação com países que já possuem expertise em tecnologia quântica, como os Estados Unidos ou

membros da União Europeia, pode acelerar o desenvolvimento local e permitir o acesso a conhecimento estratégico. No entanto, é necessário equilibrar essas colaborações com a busca por autonomia tecnológica em nichos específicos, reduzindo a vulnerabilidade a pressões externas e garantindo que as tecnologias desenvolvidas atendam às necessidades específicas do Brasil.

Em síntese, a incorporação de tecnologias quânticas na defesa brasileira é um passo necessário para responder aos desafios de segurança do século XXI. Embora o país enfrente obstáculos estruturais e financeiros, iniciativas de longo prazo, como investimentos em pesquisa, formação de especialistas e parcerias estratégicas, podem posicionar o Brasil como um ator relevante nesse campo. A adoção dessas tecnologias não apenas fortaleceria a soberania nacional, mas também garantiria a proteção de seus recursos estratégicos e fronteiras em um cenário internacional cada vez mais competitivo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A corrida tecnológica contemporânea tem sido amplamente influenciada pelo avanço das tecnologias quânticas, que prometem redefinir capacidades em defesa, segurança e soberania tecnológica. Potências como Estados Unidos, China e União Europeia lideram investimentos bilionários em áreas estratégicas como criptografia quântica, sensores de alta precisão, comunicações seguras e inteligência artificial quântica. Nesse contexto, o Brasil se depara com desafios estruturais, mas também com oportunidades relevantes para reposicionar-se no cenário internacional.

As aplicações militares das tecnologias quânticas são particularmente promissoras e disruptivas. A criptografia quântica pode garantir comunicações invioláveis, enquanto computadores quânticos ameaçam quebrar sistemas clássicos de segurança, como o RSA. Além disso, sensores quânticos têm potencial para detectar alvos antes invisíveis, como submarinos e aeronaves furtivas, impactando estratégias tradicionais de defesa.

Entre os países analisados, os Estados Unidos mantêm uma posição de liderança, apoiados por infraestrutura robusta, políticas públicas consistentes e parcerias estratégicas com setor privado e centros de pesquisa. A expectativa é que as tecnologias quânticas sejam gradualmente integradas às operações militares, conferindo vantagem competitiva em segurança cibernética e vigilância estratégica.

A China, por sua vez, avança rapidamente e já é percebida como concorrente direta dos EUA. Seu progresso em comunicações quânticas e criptografia militar gera tensões geopolíticas e amplia a percepção de que o domínio quântico é tanto uma questão científica quanto estratégica.

O Brasil, embora disponha de uma comunidade científica qualificada, ainda enfrenta entraves como baixos investimentos, falta de integração entre setores civil e militar, e alta dependência de

tecnologias estrangeiras. Tais fatores limitam sua capacidade de desenvolver aplicações autônomas no setor de defesa.

Por outro lado, o país possui nichos promissores, como sensores e comunicação quântica, além de experiência acumulada em cooperação científica internacional. Para transformar esse potencial em capacidade efetiva, é necessário estabelecer uma política nacional de tecnologias emergentes, com foco no setor quântico, articulando investimentos, inovação e formação de pessoal.

A modernização da estratégia de defesa nacional deve incluir a capacitação técnica das Forças Armadas, o fortalecimento da proteção cibernética e o engajamento em fóruns internacionais sobre a regulação do uso militar de tecnologias quânticas. Reconhecendo que seus impactos extrapolam o campo militar, o Brasil deve adotar uma abordagem transversal e preventiva, considerando também as dimensões econômica, industrial e social da revolução quântica.

Apesar das contribuições apresentadas, este estudo possui algumas limitações que merecem destaque. A principal refere-se à natureza qualitativa e exploratória da pesquisa, que, embora permita uma análise aprofundada e contextualizada, não possibilita generalizações amplas. A ausência de entrevistas com especialistas ou representantes de instituições de defesa também restringe uma compreensão mais prática e aplicada do tema no contexto brasileiro.

Com base nessas limitações, sugere-se que futuras pesquisas ampliem a abordagem empírica por meio de estudos de campo, entrevistas com formuladores de políticas, militares e pesquisadores da área de tecnologias emergentes.

Em síntese, o estudo evidencia que o Brasil está diante de um dilema estratégico: manter-se à margem da transformação tecnológica global ou adotar uma postura ativa, capaz de integrá-lo a cadeias internacionais de inovação e segurança. A chave está na formulação de políticas públicas eficazes, no estímulo à pesquisa aplicada e no alinhamento entre ciência, defesa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, M. M. *et al*. “Qualidade em Pesquisa Qualitativa Organizacional: tipos de triangulação como alternativa metodológica”. **Administração: Ensino e Pesquisa**, vol. 19, n. 1, 2018.

ARAÚJO-MOREIRA, F. M. *et al*. **Tecnologias Quânticas**: A inovação disruptiva como diferencial estratégico para a Defesa Nacional. São Paulo: Editora Seven, 2023.

ARUTE, F. *et al*. “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor”. **Nature**, vol. 574, n. 7779, 2019.

ASPECT, A.; DALIBARD, J.; ROGER, G. “Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers”. **Physical Review Letters**, vol. 49, n. 25, 1982.

BAL, R. “Quantum Sensing for Military Applications”. **Journal of Defense Technologies**, vol. 6, n. 3, 2018.

BALL, P. **Beyond Weird**: Why Everything You Thought You Knew About Quantum Physics is Different. Chicago: University of Chicago Press, 2018.

BARBOSA, C.; SOUZA, F. “Tecnologias Emergentes e Defesa Nacional: O Papel da Ciência Quântica”. **Revista Brasileira de Defesa**, vol. 10, n. 2, 2022.

BENNETT, C. H.; BRASSARD, G. “Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing”. **Theoretical Computer Science**, vol. 560, 2014.

BERTOLAMI, O. **Fundamentals of quantum technologies**. New York: Springer, 2016.

BRITO, D. D. C. *et al*. “Global Military Perspectives on Quantum Technologies”. **Spectrum**, vol. 24, 2023.

BURRELL, C. “Quantum Computing and National Security: Challenges and Opportunities”. **Defense Horizons**, n. 89, 2018.

BURRILL, R. **Quantum Technologies**: Perspectives and Strategic Impacts. Oxford: Oxford University Press, 2018.

CHEN, L.; ZHANG, W. “Quantum sensing and national defense: potentials and applications”. **Science and Technology Review**, vol. 37, n. 4, 2019.

CHEN, Y.; YANG, H.; ZHAO, H. “Quantum radar technology and its developments”. **International Conference on Communications, Circuits and Systems**. Cham: IEEE, 2013.

CHOI, D. „“Quantum Technology and the Military—Revolution or Hype? The Impact of Emerging Quantum Technologies on Future Warfare”. **Portal USMCU** [2023]. Disponível em: <www.usmcu.eu>. Acesso em: 23/03/2025.

CONGRESS OF THE UNITED STATES. **National Quantum Initiative Act**. Washington: Congress Of The United States, 2018.

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

DIAS, J. R.; SILVA, A. P.; LIMA, T. “A corrida pela supremacia quântica: implicações estratégicas para as potências globais”. **Revista de Geopolítica e Estratégia Internacional**, vol. 4, n. 1, 2021.

DODA, M. *et a*l. “Quantum key distribution overcoming extreme noise: Simultaneous subspace coding using high-dimensional entanglement”. **Physical Review Applied**, vol. 15, n. 3, 2021.

DUPONT, F.; LEFÈVRE, J. “Strategic Initiatives in Quantum Technologies Across the European Union”. **European Defense Journal**, vol. 19, n. 3, 2022.

ERTL, H. *et al*. “Quantum Technology Roadmap: The European Perspective”. **Journal of Technological Studies**, vol. 22, n. 2, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. **European Declaration on Quantum Technologies**. Brussels: European Commission, 2023. Disponível em: <www.commission.europa.eu>. Acesso em: 12/04/2025.

EUROPEAN COMMISSION. **Quantum Technologies Flagship**. Brussels: European Commission, 2018. Disponível em: <www.commission.europa.eu>. Acesso em: 12/04/2025.

EUROPEAN PARLIAMENT. **Quantum**: what is it and where does the EU stand? Brussels: European Parliament, 2023. Disponível em: <www.europa.eu>. Acesso em: 12/04/2025, 2024.

FERREIRA, J.; LIMA, R. "Sensores Quânticos e Suas Aplicações na Defesa Marítima do Brasil". **Defesa e Tecnologia**, vol. 15, n. 4, 2021.

GARCÍA, L.; SCHMIDT, P. "Quantum Radar Systems for European Defense Applications". **Journal of Advanced Defense Systems**, vol. 29, n. 4, 2022.

KANIA, E. B. **Securing our 5G future**: the competitive challenge of next-generation wireless technologies. Washington: Center for a New American Security, 2020. Disponível em: <www.cnas.org>. Acesso em: 25/03/2025.

KELLER, J.; MEYER, T. "Secure Communication Through Quantum Key Distribution: The EuroQCI Project". **Journal of Quantum Security**, vol. 11, n. 1, 2020.

KRELINA, M.; DÚBŘAVČÍK, D. "Quantum Technology for Defence: What to Expect for the Air and Space Domains". **The Journal of the JAPCC**, vol. 35, 2023.

LI, Q.; ZHOU, H.; YANG, L. "The Development of Quantum Technologies in China: Opportunities and Challenges". **Science and Technology Studies**, vol. 15, n. 4, 2020.

LI, X.; HUANG, Y.; ZENG, B. "Strategic development of quantum technologies in China". **Chinese Journal of Quantum Information**, vol. 3, n. 2, 2020.

MONROE, C.; KIM, J. "Scaling the Ion Trap Quantum Processor". **Science**, vol. 339, n. 6124, 2019.

NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. **Quantum Computation and Quantum Information**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

NIST - National Institute Of Standards And Technology. **Quantum Information Science (QIS) Programs and Priorities**. Gaithersburg: U.S. Department of Commerce, 2023.

NORMILE, D. "China's quantum push". **Nature**, vol. 589, 2021.

NORMILE, D. "China's quantum push". **Science**, vol. 372, n. 6540, 2021.

NOVAK, M.; HEINRICH, F. "Quantum Sensors: Revolutionizing Navigation and Detection in Defense". **Defense Science and Innovation**, vol. 17, n. 6, 2021.

O'ROURKE, R. **Emerging military technologies**: background and issues for Congress. Washington: Congressional Research Service, 2020.

OLIVEIRA, M.; PEREIRA, T. "Avanços em Radar Quântico e a Soberania Amazônica". **Revista de Estudos Estratégicos**, vol. 18, n. 1, 2023.

PIRANDOLA, S. *et al*. “Advances in quantum cryptography”. **Advances in Optics and Photonics**, vol. 12, n. 4, 2020.

PRESKILL, J. “Quantum computing in the NISQ era and beyond”. **Quantum**, vol. 2, 2018.

SCHLOSSHAUER, M. **Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition**. Berlin: Springer, 2007.

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

SILVA, S. P.; GOMES FILHO, P. R. S. “Guerra informacional no campo de batalha”. **Centro De Estudos Estratégicos Do Exército: Análise Estratégica**, vol. 24, n. 2, 2022.

SUN, K.; LIU, J. “Navigational Applications of Quantum Sensors”. **Defense Science Journal**, vol. 25, n. 6, 2020.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. **Redes de Computadores**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

UNITED STATES. **FM 3-0**: Operations. Washington: Department of the Army, 2022.

UNITED STATES. **National Science and Technology Council – Subcommittee on Quantum Information Science**. Washington: Executive Office of the President of the United States, 2022. Disponível em: <www.quantum.gov>. Acesso em: 29 maio 2025.

VALLONE, G. *et al.* “Experimental satellite quantum communications”. **Physical Review Letters**, vol. 115, n. 4, 2015.

WANG, L.; ZHANG, Y. Quantum networks and China’s communication strategy**. Journal of Strategic Studies**, vol. 45, n. 3, 2022.

WENDIN, G. “Quantum information processing with superconducting circuits: A review”. **Reports on Progress in Physics**, vol. 80, n. 10, 2017.

YELIN, S. F. *et al*. **Quantum technologies and national security: a white paper**. American Physical Society, 2022. Disponível em: <www.aps.org>. Acesso em: 25/03/2025.

ZENG, W.; HUANG, P. “Collaborative Innovation in Quantum Science: The Chinese Model”. **Quantum Technology and Society**, vol. 18, n. 2, 2021.

ZHOU, W.; LI, M. “Quantum radar and stealth technology: analysis and prospects”. **Chinese Journal of Defense Technology**, vol. 39, n. 2, 2018.



BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)

Ano VII | Volume 22 | Nº 65 | Boa Vista|2025

http://www.ioles.com.br/boca

Editor chefe:

Elói Martins Senhoras

Conselho Editorial

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

Conselho Científico

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Rozane Pereira Ignácio, Universidade Estadual de Roraima