

Tecnologias quânticas na defesa do Brasil: desafios, oportunidades e *roadmap*

Quantum Technologies in Brazil's Defense: Challenges, Opportunities, and Roadmap

Rev. Bras. Est. Def. v. 13, e026007, 2026, p. 1–37
ISSN 2358-3932

THAYS FELIPE DAVID DE OLIVEIRA
CARLOS EDUARDO FRANCO AZEVEDO
FERNANDO M. ARAÚJO-MOREIRA

INTRODUÇÃO

As tecnologias quânticas (TQ) vêm sendo tratadas como um conjunto de tecnologias emergentes de alto impacto potencial, com implicações crescentes para os campos da segurança e da defesa (Degen, Reinhard, e Cappellaro 2017; National Academies of Sciences, Engineering, e Medicine 2019; Krelina 2021). Baseadas em superposição, emaranhamento e interferência, abrangem computação quântica, criptografia quântica e sensores quânticos, com aplicações potenciais em comunicações seguras, sensoriamento de alta precisão e simulação computacional. A literatura sobre políticas públicas para tecnologias emergentes tem avançado na análise de países líderes (Taeihagh, Ramesh e Howlett 2021; Mazzucato 2018), mas ainda oferece respostas limitadas para casos de países em desenvolvi-

Thays Felipe David de Oliveira é pós-doutoranda em Engenharia Nuclear (IME), com foco em Tecnologias Quânticas e Defesa. Doutora em Ciência Política (UFPE). Mestre em Antropologia (UFPB). Bolsista Finep no projeto de sensores QBRN (Convênio 01.22.0534.00). Publicações em CiberDefesa, IA e Tecnologias Quânticas. **Contribuição:** concepção, análise e redação do artigo. Orcid.org/0000-0002-7317-5704?lang=en. E-mail: thays.felipe@ime.br.

Carlos Eduardo Franco Azevedo é doutor em Administração (FGV). Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciências Militares (Eceme). Assessor de Planejamento Estratégico e Inovação da Pró-Reitoria de Pesquisa (Eceme). Coordenador-Adjunto do projeto Pro-Defesa V em Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas. **Contribuição:** orientação, revisão teórico-metodológica e análise crítica. Orcid.org/0000-0002-8021-0723. E-mail: francoazevedo@francoazevedo.com.br.

Fernando M. Araújo-Moreira é professor titular e coordenador de pesquisa SE7/Engenharia Nuclear (IME). Doutor em Física. Líder Interforças em Tecnologias Quânticas (MD). Coordenador de Projetos Finep em sensores QBRN, Quantum e do Pró-Defesa V. Autor/coautor de 361 publicações, 16 patentes e 16 livros, H-index = 30 e i10-index = 62 em revistas indexadas. **Contribuição:** coordenação geral, validação científica, revisão de conteúdo. Orcid.org/0000-0002-5423-0405. E-mail: fernando.mmanuel@ime.br.

mento com capacidade científica consolidada e baixa conversão dessa base em aplicações estratégicas coordenadas, configuração que o caso brasileiro ilustra de forma expressiva.

Para o Brasil, a emergência das tecnologias quânticas coloca simultaneamente oportunidades e desafios estratégicos. Em razão de suas dimensões continentais, da necessidade de monitorar áreas sensíveis, como a Amazônia e o Atlântico Sul, e da crescente relevância de comunicações seguras e capacidades avançadas de sensoriamento, essas tecnologias podem adquirir relevância para políticas de segurança e defesa. Isso não implica atribuir primazia automática ao setor de defesa, mas examiná-lo como arranjo institucional potencialmente relevante para indução de demanda, coordenação e escala em uma área marcada por alta incerteza tecnológica e baixa articulação intersetorial (Mazzucato 2018; Weiss 2014; Ruttan 2006).

No entanto, o desenvolvimento quântico brasileiro permanece fragmentado. Iniciativas científicas relevantes, como o investimento de R\$ 5 bilhões pelo MCTI até 2034 (*Revista Fórum* 2025), o Centro de Competência em Tecnologias Quânticas no Senai Cimatec com recursos de R\$ 60 milhões (Brasil 2023) e o Laboratório de Tecnologias Quânticas do CBPF (Brasil 2025), seguem pouco articuladas às diretrizes do Ministério da Defesa, enquanto documentos como a Política de Defesa Nacional (PDN) e a Estratégia Nacional de Defesa (END) não incorporam explicitamente essas tecnologias. Nesse sentido, o problema central não é a ausência de capacidade científica, mas a dificuldade de converter essa base em capacidades tecnológicas coordenadas para fins estratégicos de Estado.

No plano internacional, a literatura sobre governança de tecnologias quânticas concentra-se sobretudo em grandes potências e blocos centrais, com destaque para os modelos americano, europeu e chinês (Kreliina 2021; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2019; Qureca 2025; Ecipe 2024). No Brasil, embora os estudos sobre inovação em defesa e barreiras institucionais tenham avançado (Azevedo 2018; Dagnino 2010; Amarante 2013; Saint-Pierre e Winand 2018; Alsina Jr. 2009), ainda é limitada a articulação entre esse debate, a dimensão quântica e a literatura de políticas públicas aplicada a tecnologias emergentes. É nessa lacuna que o artigo se insere.

Nesse contexto, a questão central deste estudo é: quais os principais desafios e oportunidades para a implementação de políticas públicas de tecnologias quânticas voltadas à defesa do Brasil? O *puzzle* do artigo pode ser formulado nos seguintes termos: por que um país com base científica reconhecida internacionalmente em física quântica apresenta baixa capacidade de converter esse conhecimento em capacidades tecnológicas coordenadas para fins estratégicos de Estado? Para enfrentar esse problema,

o trabalho adota o modelo do ciclo de políticas públicas (*policy cycle*) de Lasswell (1956) e Howlett e Ramesh (1995) como referencial teórico, por sua utilidade para examinar inovação tecnológica em contextos institucionais complexos.

O objetivo do artigo é analisar os desafios e as oportunidades para a formulação e implementação de políticas públicas capazes de promover tecnologias quânticas com implicações para a defesa no Brasil. Ao articular a literatura sobre políticas para tecnologias emergentes, governança de defesa e inovação no contexto brasileiro, o estudo busca oferecer um diagnóstico integrado do descompasso entre produção científica nacional e prioridades estratégicas, bem como indicar diretrizes teóricas e práticas para políticas mais coerentes, coordenadas e estrategicamente informadas.

REFERENCIAL TEÓRICO: O CICLO DE POLÍTICAS PÚBLICAS E TECNOLOGIAS QUÂNTICAS PARA DEFESA

Esta seção estabelece o arcabouço teórico para analisar a implementação de políticas públicas de tecnologias quânticas (TQ) na defesa brasileira, discutindo a evolução das abordagens teóricas em políticas públicas, a aplicação do modelo do ciclo de políticas públicas a tecnologias emergentes e o contexto das políticas de defesa e inovação tecnológica no Brasil.

Abordagens teóricas em políticas públicas

O estudo das políticas públicas emergiu como campo disciplinar autônomo na segunda metade do século XX, buscando compreender como os governos traduzem intenções políticas em programas e ações. A tradição sistêmica, inaugurada por David Easton, conceitualizou as políticas públicas como *outputs* de um sistema político que processa demandas (*inputs*). Embora útil para a dimensão macro, essa perspectiva mostrou-se insuficiente para capturar as nuances dos processos decisórios. Paralelamente, a escola incrementalista, liderada por Charles Lindblom, propôs que as políticas são formuladas por ajustes marginais e aproximações sucessivas, contestando modelos racionalistas (Lindblom 1959; 1979).

A partir dos anos 1980, o campo testemunhou uma proliferação de abordagens mais sofisticadas. O modelo de múltiplos fluxos, desenvolvido por John Kingdon, sugeriu que as políticas emergem da convergência de três fluxos independentes: problemas, soluções políticas e política. Janelas de oportunidade se abrem quando esses fluxos convergem, permitindo que questões ascendam à agenda governamental (Kingdon 1984; 2003). Contemporaneamente, Paul Sabatier e Jenkins-Smith desenvolvem

ram a teoria das coalizões de defesa, que enfatiza o papel das ideias, crenças e aprendizado na formulação de políticas, sendo relevante para políticas científicas e tecnológicas (Sabatier e Jenkins-Smith 1993; Sabatier e Weible 2007). Concomitantemente, a análise de redes de políticas ganhou proeminência para compreender como padrões de relacionamento entre atores governamentais e não-governamentais influenciam os processos de formulação e implementação, especialmente em políticas que atravessam fronteiras setoriais (Rhodes 1997; Börzel 1998).

Apesar da riqueza dessas contribuições, este estudo adota o modelo do ciclo de políticas públicas como referencial analítico principal. Essa escolha deriva de sua adequação específica para examinar processos de inovação tecnológica em contextos institucionais complexos como a interface entre ciência, tecnologia e defesa no Brasil. O modelo cíclico, desenvolvido inicialmente por Harold Lasswell (1956) e refinado por Michael Howlett e M. Ramesh (1995; 2003), oferece uma estrutura heurística que permite decompor processos políticos complexos em estágios analiticamente distintos, facilitando a pesquisa empírica e a comparação entre diferentes casos e contextos (Howlett, Ramesh e Perl 2009).

O ciclo de políticas públicas aplicado a tecnologias emergentes

O modelo do ciclo de políticas públicas estrutura-se tradicionalmente em cinco estágios inter-relacionados: definição da agenda, formulação de políticas, tomada de decisão, implementação e avaliação. Embora essa sequência possa sugerir linearidade, a realidade dos processos políticos é caracterizada por *feedback loops*, sobreposições temporais e influências mútuas. No contexto das tecnologias emergentes, particularmente as quânticas, essas características tornam-se ainda mais pronunciadas devido à natureza evolutiva do conhecimento científico e às incertezas inerentes aos processos de inovação.

A definição da agenda para tecnologias emergentes é profundamente influenciada por fatores que transcendem as dinâmicas políticas tradicionais, como descobertas científicas, desenvolvimentos em outros países e preocupações com segurança nacional. À luz de Baumgartner e Jones (1993; 2009), esses fatores operam como eventos focalizadores (*focusing events*) que concentram a atenção institucional e rompem a inércia burocrática. Contudo, o impacto desses eventos sobre a agenda não é automático; ele depende da construção de uma imagem de política pública (*policy image*) que redefina o enquadramento estratégico da tecnologia — deslocando-a de uma percepção estritamente científica para a de um imperativo de segurança. Esse novo enquadramento facilita o deslocamento de arena

(*venue shopping*), permitindo que o tema migre de subsistemas técnicos para arenas decisórias de alto nível, como os ministérios de defesa e segurança, onde encontra maior capacidade de institucionalização (Pralle 2003). A dinâmica da agenda também é caracterizada pela elevada importância de comunidades epistêmicas — entendidas, à luz de Haas (1992), como redes de especialistas com autoridade reconhecida em determinado domínio e que compartilham crenças normativas, entendimentos causais e critérios de validade. Essas redes produzem conhecimento técnico e atuam como *policy entrepreneurs* (Haas 1992; Dunlop 2014), sendo fundamentais para a tradução de incertezas científicas em problemas de política pública.

O estágio de formulação de políticas para tecnologias emergentes apresenta desafios únicos, exigindo a articulação de conhecimento científico altamente especializado com objetivos estratégicos de longo prazo, a coordenação de atores com culturas organizacionais distintas (universidades, empresas, agências governamentais, forças armadas). Essa coordenação não é um processo espontâneo, sendo obtida por meio de arranjos institucionais que definem as regras de interação e reduzem assimetrias entre os envolvidos. À luz de Borrás e Edquist (2013), a articulação é viabilizada pela escolha estratégica de instrumentos de política — regulatórios, econômicos e de suporte — capazes de alinhar incentivos e mitigar dilemas de ação coletiva. Em contextos de grandes desafios tecnológicos, o Estado assume o papel de facilitador de “variedades de cooperação”, estabelecendo instâncias de governança que funcionam como espaços de negociação para solucionar conflitos de interesse e estabilizar compromissos entre as diferentes lógicas organizacionais (Kuhlmann e Rip 2018).

A implementação de políticas de TQ revela dimensões adicionais de complexidade, requerendo a criação simultânea de conhecimento, capacidades e instituições. Este processo é caracterizado por altos níveis de incerteza técnica, longos períodos de maturação e a necessidade de ajustes contínuos. O conceito de “burocratas de nível de rua” de Michael Lipsky (1980) ganha nova dimensão, pois pesquisadores e gestores operam com discricionariedade técnica que influencia decisivamente os resultados das políticas.

A implementação também exige coordenação entre múltiplos níveis de governo e domínios de política, dada a transversalidade das tecnologias quânticas (Pressman e Wildavsky 1973; Peters 2018). Contudo, a ausência dessa coordenação pode gerar paralisia ou fragmentação de esforços, exigindo mecanismos institucionais de ajuste. À luz de Matland (1995), a resolução de dilemas na implementação passa pela redução da ambiguidade administrativa e pelo manejo de conflitos entre os atores. Saídas institucionais para falhas de coordenação incluem a definição mais precisa de atribui-

ções organizacionais — reduzindo a ambiguidade — e o estabelecimento de níveis mais robustos de obrigatoriedade das funções para mitigar conflitos, assegurando o alinhamento das ações aos objetivos estratégicos de Estado.

A avaliação de políticas para tecnologias quânticas apresenta desafios metodológicos e conceituais únicos, uma vez que métricas tradicionais de eficiência mostram-se inadequadas para capturar impactos de longo prazo e benefícios estratégicos intangíveis. Nesse contexto, a avaliação deve enfrentar a tensão inerente entre a transparência democrática e os requisitos de segurança nacional. À luz de Vedung (1997), esse estágio não pode ser reduzido a um monitoramento técnico, mas deve ser compreendido como um mecanismo de prestação de contas (*accountability*) que exige critérios claros de efetividade, mesmo sob condições de sigilo. Conforme discute Arretche (2001), o equilíbrio entre o segredo de Estado e o controle público é viabilizado por arranjos institucionais específicos que definem as capacidades de escrutínio e os limites da publicidade. Assim, a natureza sensível da tecnologia não deve servir como óbice à legitimidade democrática, mas sim demandar *frameworks* de avaliação que integrem a proteção de informações sensíveis ao controle institucional das políticas de defesa.

Políticas de defesa e inovação tecnológica no Brasil

A análise das políticas de defesa brasileira revela um sistema complexo que, embora tenha evoluído desde a redemocratização, ainda enfrenta desafios estruturais para incorporar tecnologias emergentes de forma estratégica e coordenada. O marco institucional contemporâneo da defesa brasileira foi estabelecido pela Constituição de 1988 e refinado por documentos como a END e PDN. Contudo, a análise desses documentos revela lacunas significativas no que se refere a tecnologias emergentes, particularmente as quânticas (Brasil 2012; 2018; 2020).

O sistema brasileiro de políticas de defesa pode ser categorizado em três tipos: políticas estruturantes (*frameworks* legais e orçamentários), operacionais (aplicação concreta de capacidades militares) e complementares (atividades de suporte como P&D e educação militar) (Oliveira 2017; Saint-Pierre e Winand 2018). As tecnologias quânticas, devido à sua natureza transversal, intersectam com os três tipos de políticas, demandando revisão de *frameworks* legais, investimentos em educação científica especializada e desenvolvimento de uma base industrial nacional.

A inserção das TQ na defesa brasileira também deve ser compreendida no contexto da política científica e tecnológica nacional. O Brasil possui um sistema nacional de inovação relativamente sofisticado, com universidades e institutos de pesquisa que produziram competências científicas re-

conhecidas internacionalmente em áreas da física fundamental relevantes para tecnologias quânticas. Contudo, a tradução dessas competências em capacidades tecnológicas aplicadas à defesa enfrenta obstáculos significativos, como a cultura acadêmica que privilegia pesquisa básica e a carência de capacidades na base industrial de defesa para tecnologias de fronteira (Dagnino 2010; Amarante 2013).

A coordenação entre o sistema nacional de ciência e tecnologia e o sistema de defesa também enfrenta desafios institucionais significativos (Azevedo 2018). Embora existam mecanismos formais de coordenação, a prática revela dificuldades persistentes em alinhar prioridades e compartilhar recursos. Esses obstáculos transcendem a dimensão técnica, sendo exacerbados por descontinuidades políticas que alteram a priorização estratégica do tema a cada ciclo governamental. Conforme demonstra Azevedo (2018), tais dificuldades decorrem de barreiras culturais profundas e de uma estrutura institucional fragmentada que privilegia a autonomia burocrática em detrimento da integração estratégica. Sob a ótica dos “silos burocráticos” (Peters 2018), esse quadro é alimentado por disputas de recursos entre órgãos civis e militares, o que pode esvaziar os mecanismos formais de coordenação em favor de agendas com retornos políticos ou econômicos mais imediatos. No caso de TQ, essa coordenação torna-se ainda mais crítica devido aos altos custos de entrada e aos longos períodos de desenvolvimento tecnológico (Silva 2015; Brigagão e Proença Júnior 2002). A dimensão internacional adiciona complexidade, pois o Brasil busca autonomia estratégica em um cenário global polarizado, exigindo escolhas difíceis sobre cooperação e proteção de capacidades nacionais.

A aplicação do modelo do ciclo de políticas públicas ao caso das tecnologias quânticas para defesa no Brasil oferece *insights* valiosos sobre os desafios e oportunidades. O modelo permite identificar gargalos específicos em cada estágio do processo político, desde a dificuldade de inserir tecnologias emergentes na agenda governamental até os desafios de coordenação na implementação e os problemas metodológicos na avaliação. Esta síntese teórica fornece a base conceitual necessária para a análise empírica apresentada nas seções subsequentes deste trabalho (Bitencourt e Vaz 2009; Penha 2011).

METODOLOGIA

Este estudo adota abordagem qualitativa, exploratória e descritiva para analisar desafios e oportunidades das políticas públicas de tecnologias quânticas na defesa brasileira. A complexidade do tema e a necessidade de compreender contextos institucionais, políticos e tecnológicos justificam

essa metodologia, que permite identificar lacunas críticas e propor diretrizes estratégicas eficazes.

Para operacionalizar essa abordagem, a pesquisa estrutura-se em três componentes metodológicos complementares. O primeiro componente consiste na análise documental, que examinou documentos estratégicos nacionais (PDN, END, LBDN) e internacionais, investigando menções específicas a tecnologias quânticas e sua integração sistemática na defesa. Complementarmente, o segundo componente envolveu revisão bibliográfica abrangente, mapeando artigos, livros e relatórios técnicos dos últimos dez anos nas bases Scopus, Web of Science e Google Scholar, com foco em tecnologias quânticas, políticas públicas e segurança nacional. O terceiro componente realizou estudo comparativo internacional, analisando programas quânticos de EUA, China, Alemanha, Reino Unido e Canadá, países selecionados por seu protagonismo e desenvolvimento de políticas específicas, identificando modelos e estratégias adaptáveis à realidade institucional, econômica e geopolítica brasileira.

Para sistematizar o diagnóstico da situação brasileira, desenvolveu-se uma escala qualitativa de avaliação de 0 a 10 para cada estágio do ciclo de políticas públicas, onde 0 representa ausência total, 1-3 indica nível inicial, 4-6 corresponde a desenvolvimento moderado, 7-8 caracteriza estágio avançado, e 9-10 representa excelência. Os critérios de avaliação abrangem dimensões específicas: definição da agenda considerou a presença em documentos estratégicos e resposta a eventos internacionais; formulação analisou coordenação interministerial e disponibilidade de recursos; implementação verificou a existência de programas específicos para defesa; e avaliação examinou mecanismos de monitoramento e indicadores de desempenho. A pontuação final baseou-se em análise documental comparativa com *benchmarks* internacionais estabelecidos por países líderes e validação por triangulação metodológica com relatórios de órgãos especializados.

Os cenários prospectivos apresentados no presente estudo foram construídos por meio da combinação qualitativa de três variáveis-chave identificadas na literatura sobre implementação de políticas para tecnologias emergentes: nível de coordenação institucional interministerial, sustentabilidade do financiamento ao longo de múltiplos ciclos políticos e velocidade de conversão da capacidade científica em aplicações estratégicas de defesa (Taeihagh, Ramesh e Howlett 2021; Howlett 2019). Cada cenário — otimista, moderado e pessimista — corresponde a uma configuração distinta dessas variáveis, tendo como referência comparativa os cronogramas de países selecionados (IBM 2024; Quantinum 2024; Government of Canada 2023; European Commission 2024) e como ponto de partida o diagnóstico da situação brasileira elaborado na seção 4.3. Os cenários não

têm caráter preditivo nem probabilístico, mas heurístico, pois buscam delimitar possibilidades institucionais para o caso brasileiro, em conformidade com o escopo qualitativo e exploratório deste estudo.

O estudo reconhece limitações inerentes à pesquisa, particularmente a ausência de dados consolidados sobre investimentos em tecnologias quânticas no Brasil, que dificulta análises quantitativas precisas do cenário nacional. Adicionalmente, a rápida evolução tecnológica e a falta de consenso sobre aplicações futuras representam desafios metodológicos para políticas públicas de longo prazo. Apesar dessas limitações, a pesquisa contribui significativamente ao propor diretrizes fundamentadas para a integração estratégica de tecnologias quânticas na defesa nacional brasileira.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Panorama internacional das políticas quânticas para defesa

O panorama internacional evidencia a intensificação da competição tecnológica em torno das capacidades quânticas com potencial aplicação em defesa. Trata-se de um cenário marcado por estratégias nacionais, ampliação de investimentos e crescente associação entre tecnologias quânticas, segurança e soberania. Investimentos globais atingiram US\$ 49 bilhões, com projeção de US\$ 200 bilhões até 2030, indicando amadurecimento do campo e avanço em direção a aplicações práticas (The Quantum Insider 2025).

A análise de investimentos globais (Tabela 1) revela três padrões estratégicos relevantes para o Brasil. Primeiro, a bipolarização entre Estados Unidos e China, que concentra 45% do total, sugere uma dinâmica competitiva capaz de marginalizar países intermediários sem estratégias próprias. Segundo, países como Reino Unido, Canadá e Austrália adotam estratégias de especialização, concentrando recursos em nichos tecnológicos e funcionais; no caso australiano, isso inclui aplicações de defesa. Terceiro, a transparência sobre usos militares varia significativamente: Estados Unidos e Austrália divulgam investimentos em defesa, a China mantém maior opacidade e a União Europeia integra o tema em programas mais amplos de pesquisa e inovação. Para o Brasil, essa variação é relevante porque a definição do grau de publicidade de programas quânticos de defesa envolve escolha política com efeitos sobre cooperação internacional, percepção externa e autonomia decisória. Sob a ótica de Johnston (1995), a cultura estratégica atua como filtro perceptivo das escolhas de defesa. No caso brasileiro, ela se articula historicamente à busca de autonomia tecnológica como mecanismo de preservação da soberania de decisão e de mitigação de vulnerabilidades externas (Alsina Jr. 2009; 2015). Oliveira

(2005) também aponta que essa tradição favorece cautela quanto à exposição pública de programas sensíveis. Assim, enquanto grandes potências tendem a orientar suas estratégias para a obtenção de vantagem tecnológica e projeção de poder, o caso brasileiro tende a privilegiar a redução de dependências externas e a preservação de margens de decisão nacional diante de constrangimentos assimétricos.

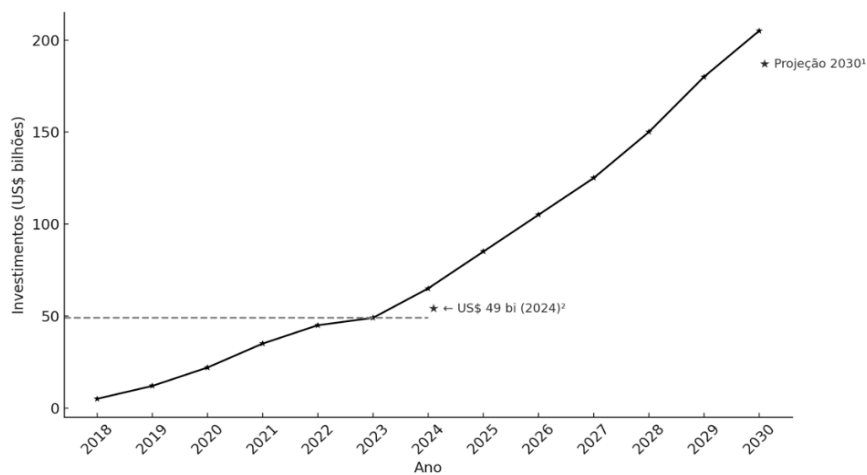
Tabela 1 — Investimentos Globais em Tecnologias Quânticas por País/Região (2018-2025)

País/Região	Investimento Total (US\$ bilhões)	Foco Principal	Aplicações Militares	Cronograma
Estados Unidos	> 3	Computação/Sensores	US\$ 100 milhões (DOD) ²	2018-2028
China	> 2,5	Comunicação Quântica	Não divulgado	2016-2030
União Europeia	1,1	Pesquisa Coordenada	Incluído no total	2018-2028
Reino Unido	1,3	Tecnologias Diversas	30% do total	2014-2029
Canadá	> 0,8	Criptografia/Sensores	Estratégia militar dedicada	2023-2033
Austrália	0,6	Sensores/Defesa	AUS\$ 60 milhões específicos	2020-2030
Alemanha	0,7	Computação	Integrado à estratégia EU	2018-2025
Japão	0,2	Computação/Comunicação	Não especificado	2018-2027

Fonte: Elaborado pelo autor com base em The Quantum Insider (2025), Qureca (2025), GovConWire (2025) e U.S. Congress (2018); European Commission (2024a); Government of Canada (2023); HM Government (2023); e documentos estratégicos nacionais: Brasil (2020a); Brasil (2020b).

A Figura 1 (a seguir) sintetiza a evolução projetada dos investimentos globais em tecnologias quânticas, com base nos US\$ 49 bilhões acumulados até 2024 e na projeção de US\$ 200 bilhões até 2030 (The Quantum Insider 2025).

Os valores de 2024 e 2030 sugerem aceleração expressiva dos investimentos globais e reforçam o reconhecimento estratégico das tecnologias quânticas por atores públicos e privados. É importante ressaltar que a trajetória intermediária apresentada no gráfico (2018-2023) representa modelagem ilustrativa desenvolvida pelo autor com base nos pontos de referência verificáveis de 2024 e 2030. Dados anuais específicos para esse período não estão amplamente disponíveis em fontes públicas, seja pela natureza sensível de parte dos investimentos em tecnologias quânticas para defesa, seja pelo caráter ainda emergente do setor.

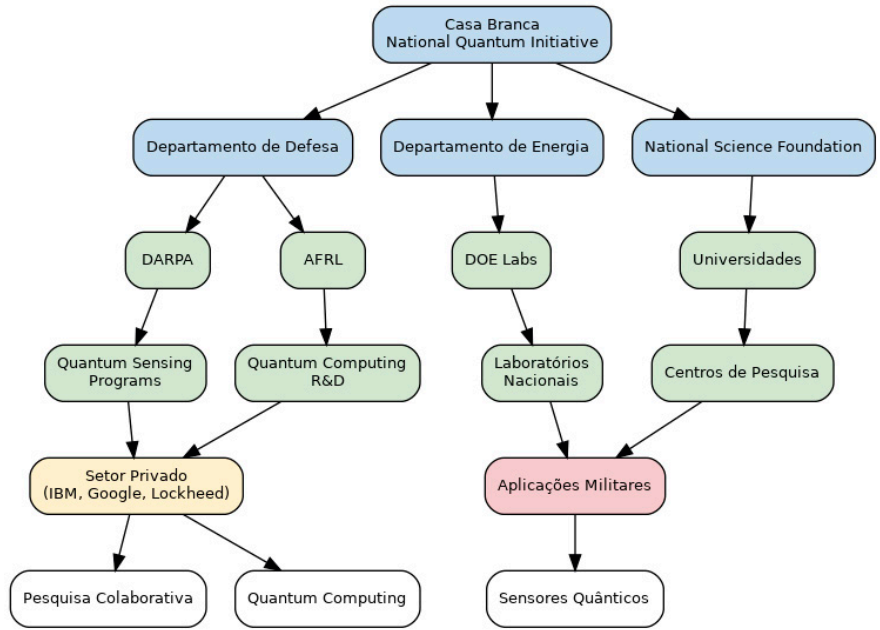


Legenda: ★ Pontos de referência e projeções

Figura 1 — Evolução dos Investimentos Globais em Tecnologias Quânticas (2018-2030).
Fonte: Elaborado pelo autor com base em The Quantum Insider (2025) e modelagem ilustrativa.

Para o Brasil, essa trajetória representa simultaneamente oportunidade e pressão temporal: o campo ainda em formação admite a entrada de novos atores, mas a aceleração dos investimentos tende a criar barreiras crescentes para países sem posicionamento estratégico claro. À luz da literatura sobre dependência de trajetória, escolhas iniciais e vantagens cumulativas favorecem os atores que se antecipam na definição de capacidades e arranjos institucionais (Pierson 2000). Em consequência, movimentos tardios enfrentam custos mais elevados de coordenação e inserção tecnológica. No caso brasileiro, a rapidez na definição de um posicionamento estratégico depende da escolha de instrumentos de política adequados (Borrás e Edquist 2013) e, sobretudo, das capacidades estatais de coordenação entre as áreas de Ciência, Tecnologia e Defesa (Gomide e Pires 2014). Sem esse suporte institucional e sem continuidade orçamentária, aumenta o risco de fragmentação decisória e aprofundamento da dependência externa em setores sensíveis.

Nesse contexto, os Estados Unidos estabeleceram uma das estratégias quânticas mais robustas, por meio do National Quantum Initiative Act (2018), coordenando agências federais, universidades e setor privado. O Departamento de Defesa destinou mais de US\$ 100 milhões a tecnologias quânticas de próxima geração, incluindo relógios atômicos, magnetômetros e software resistente à computação quântica (GovConWire 2025).



Fluxograma 1 — Modelo de Coordenação Estratégica dos EUA para Tecnologias Quânticas. Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O modelo americano, sintetizado no Fluxograma 1, destaca-se pela centralização política da agenda quântica, pela coordenação entre agências com funções complementares e pela articulação entre governo, universidades e setor privado. Mais do que um arranjo replicável, ele oferece ao caso brasileiro uma referência comparativa sobre a importância de instâncias capazes de alinhar prioridades estratégicas, capacidade científica e aplicação tecnológica. No contexto nacional, o principal contraste não reside apenas na escala dos recursos disponíveis, mas na ausência de mecanismo institucional equivalente que articule, de forma estável, os setores de Defesa, Ciência, Tecnologia e Inovação e as universidades. Em paralelo, a União Europeia e a China desenvolveram estratégias distintas de organização de suas políticas quânticas — a primeira mais orientada à coordenação multinacional e a segunda à centralização estatal —, ampliando o quadro comparativo relevante para o caso brasileiro.

Essa diversidade de arranjos institucionais indica que as políticas nacionais para tecnologias quânticas vêm sendo estruturadas segundo combinações distintas de coordenação, financiamento, transparência e inserção

internacional. Em termos comparativos, é possível identificar cinco arquétipos principais (Tabela 2).

Tabela 2 — Comparação de Estratégias Nacionais:
Modelos de Governança

Aspecto	Estados Unidos	China	União Europeia	Reino Unido	Canadá
Coordenação	Interagências	Centralizada	Multinacional	Integrada	Ministerial
Funding Model	Público-Privado	Estatal	Misto	Misto	Público-Privado
Foco Militar	Explícito	Não divulgado	Limitado	Moderado	Específico
Timeline	10 anos	15 anos	10 anos	15 anos	10 anos
Transparência	Alta	Baixa	Alta	Alta	Muito Alta
Parcerias Internacionais	Seletivas	Restritas	Abertas	Amplas	Amplas

Fonte: Elaborado pelo autor com base em The Quantum Insider (2025), Qureca (2025), U.S. Congress (2018), European Commission (2024a), Government of Canada (2023) e HM Government (2023).

O modelo americano combina coordenação interagências e financiamento público-privado orientado à inovação e à aplicabilidade militar; o modelo chinês privilegia centralização estatal, concentração de recursos e baixa transparência; e o modelo europeu multinacional enfatiza coordenação entre diferentes países, diversificação de riscos e cooperação institucionalizada. Já os modelos britânico e canadense ilustram estratégias de países de capacidade intermediária que buscam maximizar impacto por meio de especialização, *hubs* temáticos e parcerias internacionais. No caso britânico, a organização em *hubs* integra academia, indústria e defesa sob coordenação central (HM Government 2023). No caso canadense, a ênfase em colaboração internacional e transparência relativa aproxima-se de uma estratégia de “diplomacia de nicho” (Cooper, Higgott e Nossal 1993), na qual áreas funcionais específicas são mobilizadas para ampliar projeção internacional sem exigir primazia tecnológica ampla, orientação explicitada na Estratégia Nacional Quântica do Canadá (Government of Canada 2023).

Para o Brasil, os arquétipos britânico e canadense são particularmente relevantes como referências comparativas parciais, sobretudo por se tratarem de países de capacidade intermediária que recorrem a coalizões, multilateralismo e especialização para ampliar margem de atuação (Keohane 1969; Gonçalves 2009; Secches, Vadell e Ramos 2020). Ainda assim, sua adaptação exige cautela. Diferentemente do Canadá, cuja abertura interna-

cional é facilitada por sua inserção em arranjos mais estáveis de segurança e cooperação, o Brasil pauta sua cultura estratégica pela busca de autonomia, o que torna mais delicado o equilíbrio entre transparência científica, colaboração externa e segurança nacional (Saint-Pierre e Winand 2018). Além disso, as diferenças de capacidades estatais (Gomide e Pires 2014) e a fragmentação histórica entre os setores de CT&I e Defesa (Azevedo et al. 2018) limitam transplantações diretas. Assim, esses casos são menos modelos a serem reproduzidos do que referências seletivas para pensar formas de inserção internacional capazes de combinar cooperação, soberania e coordenação institucional no contexto brasileiro.

Diagnóstico da situação brasileira

A situação brasileira revela capacidades científicas em física quântica, mas fragmentação institucional e falta de coordenação estratégica entre pesquisa civil e defesa. Há lacunas em documentos de defesa nacional.

Tabela 3 — Mapeamento das Capacidades Brasileiras em Tecnologias Quânticas

Instituição	Localização	Área de Pesquisa	Recursos (R\$ milhões)	Conexão com Defesa
CBPF	Rio de Janeiro	Computação/Sensores	32 (laboratório)	Baixa
SENAI Cimatec	Salvador, BA	Comunicação/Computação	60 (centros competência)	Baixa
UNICAMP	Campinas, SP	Óptica Quântica	Não especificado	Muito Baixa
USP	São Paulo, SP	Informação Quântica	Não especificado	Muito Baixa
UFRJ	Rio de Janeiro	Física Fundamental	Não especificado	Baixa
Embrapa	São Carlos, SP	Sensores (startup)	Não especificado	Baixa

Fontes: Brasil (2025); Brasil (2023).

O mapeamento das capacidades brasileiras evidencia um descompasso estratégico entre a robustez de sua base científica em tecnologias quânticas e a limitada conversão desse conhecimento em capacidades tecnológicas coordenadas. A concentração geográfica dessas competências, sobretudo no eixo Rio–São Paulo, acrescenta vulnerabilidades a um campo sensível, ao mesmo tempo em que a presença de polos como o Senai Cimatec, em Salvador, sinaliza possibilidades de diversificação ainda insuficientemente consolidadas. A escassez de recursos estruturados para universidades com trajetória reconhecida, como Unicamp, USP e UFRJ, sugere a ausência de programas continuados capazes de transformar competências individuais

em capacidades institucionais duradouras. Tal desarticulação torna-se ainda mais visível quando contrastada com experiências internacionais em tecnologias de fronteira, nas quais o setor de defesa figura, em diversos países, como indutor relevante de demanda, financiamento e coordenação de missões tecnológicas de alto risco (Mazzucato 2018). No caso brasileiro, essa referência à defesa não implica atribuir-lhe primazia automática, mas reconhecê-la como um possível arranjo institucional de coordenação em um contexto no qual as limitações de financiamento, a baixa densidade de articulação universidade-empresa e a fragmentação interministerial reduzem a capacidade de o ecossistema civil, isoladamente, sustentar a translação tecnológica. Nesse sentido, a baixa conexão entre a base científica nacional e as demandas estratégicas do Estado não configura apenas uma lacuna circunstancial, mas evidencia a fragilidade dos mecanismos institucionais capazes de converter excelência acadêmica em capacidades tecnológicas de uso dual.

A Figura 2 visualiza o diagnóstico central: o Brasil tem lacuna de translação entre capacidades científicas (8/10) e aplicações estratégicas em defesa (2/10), comprometendo o potencial quântico nacional. Essa lacuna de 6 pontos indica baixa conversão de capacidades científicas em aplicações estratégicas e necessidade de intervenções institucionais mais consistentes.

A capacidade científica elevada (8/10) reflete décadas de investimento em RH e pesquisa básica, oferecendo plataforma para desenvolvimentos aplicados, mas demandando maior coordenação estratégica. O investimento moderado (6/10), R\$ 5 bilhões do MCTI até 2034, enfrenta desafios de sustentabilidade política e histórica oscilação de prioridades, comprometendo a continuidade necessária para tecnologias de longo ciclo. A baixa coordenação institucional (3/10) constitui gargalo crítico, dificultando o uso eficiente de recursos e a geração de sinergias entre MCTI, defesa, universidades e empresas.

A aplicação em defesa muito baixa (2/10) reflete desconexão estrutural entre produção científica e necessidades estratégicas. Essa fragilidade decorre de uma cultura estratégica pautada pela “autonomia compartimentada” (Saint-Pierre e Winand 2018), na qual o desenvolvimento tecnológico de defesa ocorreu historicamente em nichos isolados das instituições civis de CT&I. Diferentemente do Reino Unido e Canadá, associados a arranjos integrados de coordenação (HM Government 2023; Cooper, Higgott e Nossal 1993), o Brasil enfrenta fragmentação institucional que desestimula a *spill-over* tecnológico entre esferas civil e militar (Azevedo et al. 2018).

Sob a ótica do equilíbrio pontuado, essa realidade é agravada pela ausência de *policy images* (Baumgartner e Jones 1993) que confirmam urgência e utilidade dual às tecnologias quânticas. Enquanto o Reino Unido utiliza

hubs centralizados e o Canadá aposta na “diplomacia de nicho”, a trajetória brasileira é marcada por baixa densidade de capacidades estatais de coordenação intersetorial (Gomide e Pires 2014), perpetuando o descompasso entre fronteira do conhecimento e sua conversão em capacidades institucionais coordenadas.

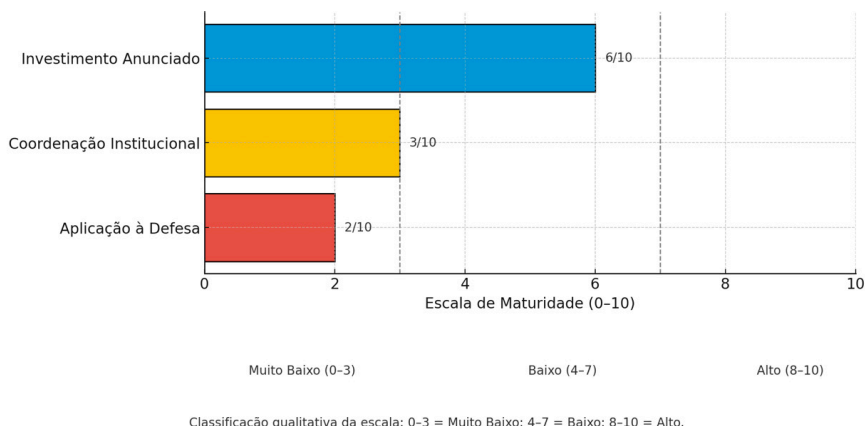


Figura 2 — Lacuna entre Capacidade Científica e Aplicação em Defesa no Brasil. Fontes: Revista Fórum (2025).

Como vimos, o governo brasileiro anunciou R\$ 5 bilhões em investimentos quânticos até 2034. Contudo, documentos estratégicos revelam lacuna crítica: ausência de menção específica a tecnologias quânticas e aplicações militares (Tabela 4).

Tabela 4 — Análise de Documentos Estratégicos Brasileiros: Presença de Tecnologias Quânticas

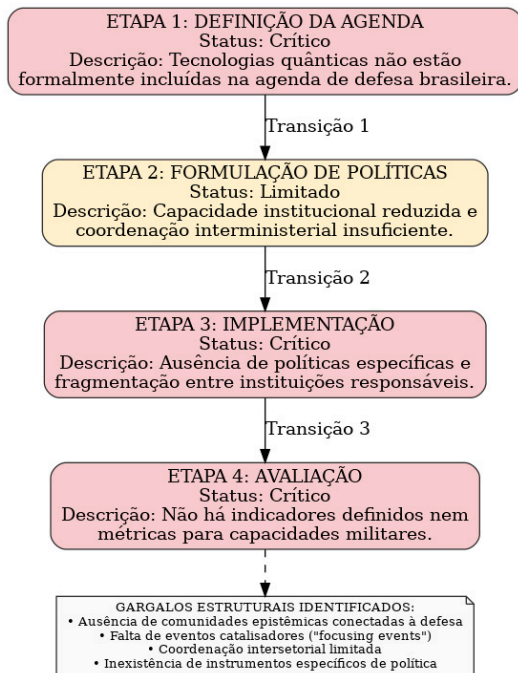
Documento	Ano	Menção Tecnologias Quânticas	Inovação Tecnológica	Autonomia Tecnológica	Nota
PDN	2020	Ausente	Genérica	Presente	3/10
END	2020	Ausente	Setorial	Enfatizada	4/10
Livro Branco	2012	Ausente	Mencionada	Presente	2/10
PNID	2018	Ausente	Genérica	Objetivo	3/10
Média Brasil	-	0%	75%	100%	3/10

Fontes: Documentos estratégicos brasileiros (Brasil 2018; 2020b; 2020a; 2012) e análise documental do autor.

A análise dos documentos basilares da Defesa Nacional (PND, END e PAED) evidencia o que se pode classificar como uma omissão estratégica de diretrizes. Embora a totalidade dos textos (100%) reitere a busca pela autonomia tecnológica, a ausência de menções específicas ao setor quântico (0%) restringe a possibilidade de que essa ambição se traduza em políticas orientadas por missões (Mazzucato 2018). Essa lacuna documental não é meramente terminológica; ela sinaliza uma limitação na antecipação tecnológica do Estado brasileiro, que encontra óbices para conferir amparo normativo a uma área de fronteira já dominada pela academia nacional. Ao contrário da experiência observada em potências líderes, onde o planejamento de Defesa define metas claras para o setor quântico, o arranjo brasileiro mantém-se em um nível de abstração que desfavorece a coordenação institucional. Assim, a pontuação de 3/10 atribuída ao alinhamento documental reflete um cenário onde a ausência de priorização formal nos documentos de alto nível limita institucionalmente a capacidade do Ministério da Defesa de atuar como indutor desse ecossistema.

Aplicação do ciclo de políticas públicas ao caso brasileiro

A aplicação do ciclo de políticas públicas ao desenvolvimento de tecnologias quânticas (TQ) na defesa brasileira revela desafios específicos em cada estágio do processo, exigindo adaptações institucionais e instrumentos de política adequados às características dessas tecnologias emergentes. O Fluxograma 2 ilustra barreiras que dificultam a definição da agenda para tecnologias quânticas no Brasil.



Fluxograma 2 — Barreiras na Definição da Agenda para Tecnologias Quânticas no Brasil. Fontes: Howlett e Ramesh (1995). *Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems*; Lasswell (1956). *The Decision Process: Seven Categories of Functional Analysis*; aplicação do referencial teórico ao caso brasileiro pelo autor.

O modelo cíclico de Howlett e Ramesh (1995; 2003) é estrutura valiosa para analisar políticas de tecnologias emergentes como as quânticas. Essas tecnologias, com evolução acelerada e alta incerteza impõem desafios específicos aos formuladores (Taeiagh, Ramesh e Howlett 2021), exigindo investimentos em capacidades institucionais e políticas antecipatórias que transcendem considerações econômicas tradicionais.

Na definição da agenda, a ausência das tecnologias quânticas como prioridade nas políticas brasileiras de defesa revela falha na identificação de *focusing events* (Kingdon 1984) — eventos essenciais para abrir janelas de oportunidade política. A supremacia quântica de empresas norte-americanas e os investimentos chineses são exemplos claros. Enquanto outros países reagiram imediatamente, o Brasil não apresentou resposta institucional correspondente, revelando limitação estrutural em sensibilidade e reatividade. Cairney (2016) destaca que ambiguidade, incerteza e restri-

ções temporais exigem adaptação contextual — capacidades ainda frágeis no Brasil.

Na formulação, a limitada capacidade institucional evidencia problema estrutural. Howlett et al. (2018) demonstram que a formulação eficaz depende da escolha e desenho adequado de instrumentos de ação governamental. A fragmentação entre MCTI e Ministério da Defesa (Azevedo 2018) transcende lacuna técnica, associando-se a trajetórias institucionais distintas, prioridades concorrentes e baixa articulação entre agendas civis e de defesa. Essa clivagem manifesta a tensão entre ciência pautada pela autonomia acadêmica civil e lógica de defesa centrada no sigilo e soberania operacional. No caso quântico, isso gera *policy mix* ineficiente, com coalizões de pesquisa básica e centros de excelência militar operando em trajetórias paralelas, dificultando a consolidação de um Complexo Industrial-Tecnológico de Defesa integrado.

A Tabela 5 apresenta o diagnóstico por estágios do ciclo, mensurado em escala 0-10 considerando atores, recursos, políticas e mecanismos institucionais, comparado a *benchmarks* internacionais.

Tabela 5 — Diagnóstico por Estágio do Ciclo de Políticas Públicas

Estágio	Situação Atual	Principais Atores	Recursos Disponíveis	Gargalos Críticos	Nível de Desenvolvimento
Agenda	Ausente	MCTI (isolado)	Baixo	Falta de focusing events	1/10
Formulação	Inicial	MCTI, Academia	Moderado	Coordenação interministerial	3/10
Implementação	Não iniciada	Instituições científicas	Fragmentado	Ausência de políticas	2/10
Avaliação	Inexistente	Nenhum ator	Nulo	Falta de indicadores	0/10

Fontes: Howlett e Ramesh (1995). *Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems*; Kingdon (1984). *Agendas, Alternatives and Public Policies*; Lipsky (1980). *Street-Level Bureaucracy*; Arretche (1998).

O diagnóstico por estágios do ciclo de políticas públicas revela descompassos críticos no desenvolvimento de capacidades quânticas aplicadas à defesa. Na definição da agenda, faltam mecanismos para captar e reagir a *focusing events* que, em outros contextos, catalisaram movimentos estratégicos. Kingdon (1984) demonstra que a mudança de agenda requer convergência entre problemas, políticas e política — condição ausente no Brasil, onde eventos como a supremacia quântica e investimentos chineses não geraram resposta institucional adequada. Cairney (2016) observa que ato-

res influentes em uma sequência podem ser menos importantes em outra, evidenciado na frágil conexão entre cientistas e formuladores de política de defesa.

Na formulação (3/10), a ausência de articulação institucional é o entrave central. Howlett (2019) argumenta que tecnologias emergentes impõem desafios de coordenação que transcendem estruturas burocráticas tradicionais. A fragmentação entre MCTI e Ministério da Defesa impede *policy mixes* adequados às especificidades quânticas. Taelhagh, Ramesh e Howlett (2021) destacam que instrumentos clássicos são insuficientes em domínios emergentes, dada a necessidade de informação técnica, previsibilidade e capacidade adaptativa.

A implementação (2/10) reproduz falhas estruturais. Pressman e Wildavsky (1973), no Projeto Oakland, mostraram que a execução depende de acordo entre grupos com objetivos distintos — condição não verificada na integração entre pesquisa básica e aplicação militar no Brasil. Hupe (2011) define isso como “implementação incongruente”, onde a multiplicidade de níveis decisórios reduz a tradução de objetivos em resultados.

A avaliação (0/10) é a lacuna mais grave. Vedung (1997) define avaliação como essencial para distinguir o valioso do inútil, permitindo aprendizados institucionais. No Brasil, não há mecanismos consolidados para avaliar políticas de tecnologias emergentes em defesa. A OECD (2023) destaca que benefícios como segurança informacional e dissuasão estratégica são difíceis de quantificar, tornando imprescindível metodologias qualitativas e adaptativas.

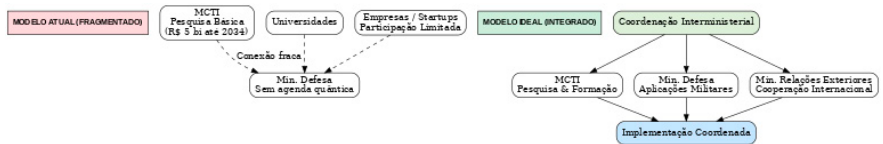


Figura 3 — Modelo Atual vs. Modelo Ideal de Política Quântica para Defesa. Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A comparação entre modelos evidencia uma lacuna crítica na coordenação institucional brasileira. O modelo atual fragmentado reflete os “silos burocráticos” (Peters 2018) que impedem a coordenação efetiva de políticas transversais. Howlett et al. (2018) argumentam que tecnologias emergentes exigem um “mix assíncrono de instrumentos” e “investimentos em capacidades políticas antecipatórias”. O modelo ideal integrado baseia-se em experiências internacionais. O *National Quantum Initiative Act* america-

no estabelece coordenação “interagências”, essencial para “governança de tecnologias disruptivas emergentes” (Taeiagh, Ramesh e Howlett 2021). A estrutura tripartite (MCTI-Defesa-Relações Exteriores) permitiria uma coordenação “evolutiva” (Howlett e Newman 2013) para responder às mudanças tecnológicas.

Oportunidades e desafios identificados

Identificar oportunidades e desafios para tecnologias quânticas na defesa brasileira é crucial para orientar futuras intervenções políticas. Esta análise apoia-se na literatura sobre políticas para tecnologias emergentes, especialmente em Taeiagh, Ramesh e Howlett (2021), que destacam a incerteza, a complexidade e as trajetórias não lineares dessas tecnologias disruptivas.

À luz desse referencial, a Tabela 6 organiza os principais condicionantes do caso brasileiro, relacionando capacidades existentes, fragilidades institucionais e fatores externos que afetam a conversão de conhecimento científico em capacidade estratégica.

Tabela 6 — Matriz de Oportunidades e Desafios para Tecnologias Quânticas na Defesa Brasileira

Dimensão	Oportunidades	Desafios	Impacto	Prazo Prioridade
Científica	Base de pesquisa sólida	Desconexão com defesa	Alto	Médio Alta
Institucional	Autonomia decisória	Fragmentação ministerial	Muito Alto	Longo Crítica
Geográfica	Dimensões continentais	Complexidade logística	Alto	Longo Alta
Industrial	Empresas nacionais consolidadas	Capacidades limitadas	Alto	Médio Alta
Financeira	Investimento anunciado (R\$ 5 bi)	Sustentabilidade fiscal	Muito Alto	Médio Crítica
Internacional	Tradição de autonomia	Competição tecnológica	Moderado	Curto Moderada
Recursos Humanos	Universidades de qualidade	Massa crítica insuficiente	Alto	Longo Alta

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Taeiagh et al. (2021); Ecipe (2024); Qureca (2025); CSIS (2025); Mercator Institute for China Studies (2024).

A Tabela 6 evidencia que o principal desafio brasileiro não é a ausência de capacidades científicas, mas a dificuldade de convertê-las em capacidades estratégicas e aplicações de defesa. Em perspectiva comparada, a União

Europeia também enfrenta problemas de translação entre base científica e aplicação, sugerindo que a desconexão entre conhecimento e uso estratégico não é exclusivamente brasileira. No caso nacional, porém, a fragmentação entre ciência, tecnologia e defesa agrava esse quadro ao limitar a articulação entre competências existentes, prioridades estratégicas e instrumentos de política.

A comparação internacional sugere que o diferencial entre avanço e estagnação depende menos do volume de recursos do que da capacidade de coordenar instituições, sustentar prioridades e manter continuidade. Embora o investimento de R\$ 5 bilhões até 2034 seja relevante, seu efeito dependerá da capacidade de sustentar coordenação, previsibilidade orçamentária e alinhamento entre prioridades científicas e estratégicas. Em termos de implementação, trata-se de problema clássico de coordenação entre atores com objetivos distintos (Pressman e Wildavsky 1973), agravado pelas incertezas e longos ciclos de maturação das tecnologias emergentes (Taeihagh, Ramesh e Howlett 2021).

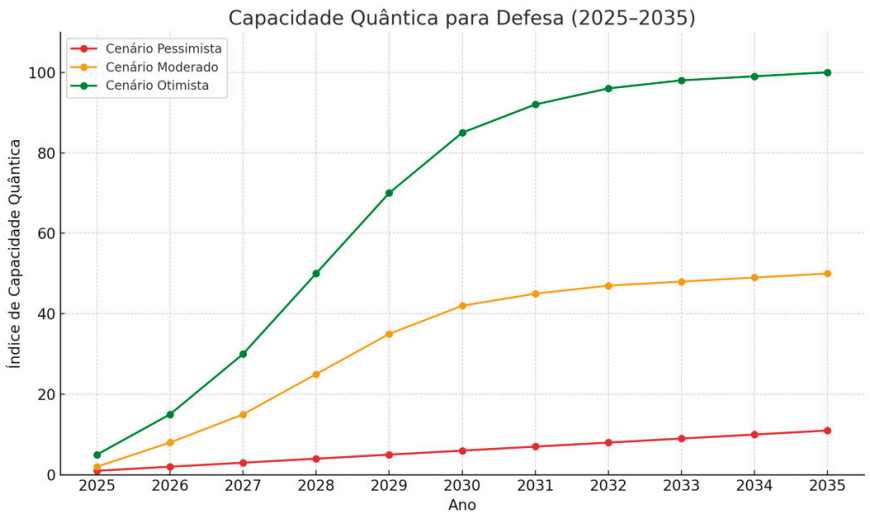


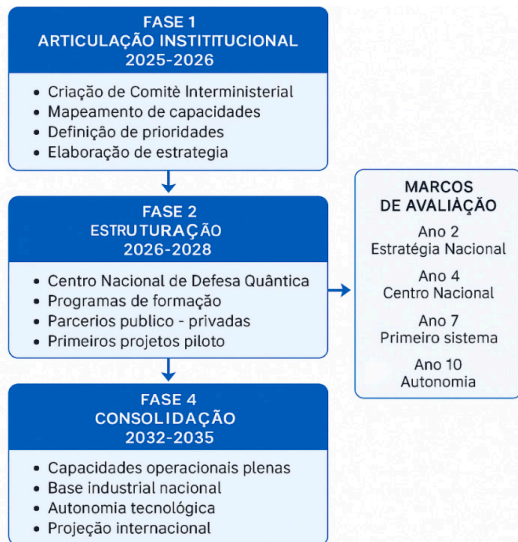
Figura 4 — Cenários de Desenvolvimento Quântico Brasileiro (2025-2035)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBM (2024); European Commission (2024); Government of Canada (2023); fundamentação teórica em Kingdon (1984); Howlett et al. (2018); Vedung (1997).

A Figura 4 apresenta três cenários prospectivos para o desenvolvimento quântico brasileiro entre 2025 e 2035, construídos a partir de cronogramas

internacionais e da literatura sobre agenda, coordenação e continuidade institucional. O cenário otimista pressupõe convergência entre problema, soluções e condições políticas (Kingdon 1984), além de estabilidade para sustentar coordenação interministerial e investimentos contínuos. O cenário moderado corresponde a avanços científicos e institucionais limitados, sem translação robusta para aplicações estratégicas. O cenário restritivo resulta da persistência da fragmentação, descontinuidade política e insuficiência de coordenação e financiamento. Em todos os casos, a diferença decisiva reside na capacidade estatal de organizar capacidades de modo cumulativo e estratégico.

O Fluxograma 3 traduz essas possibilidades em proposta gradual estruturada em etapas de formulação, coordenação, consolidação e maturação. Em vez de reproduzir modelos externos, o *roadmap* adapta lições comparadas às restrições brasileiras de capacidade estatal, coordenação interministerial e integração entre ciência, tecnologia e defesa, visando reduzir dispersão decisória, alinhar incentivos organizacionais e criar condições para continuidade institucional. O detalhamento de atores, atribuições, recursos e entregas é apresentado na seção “Operacionalização do *roadmap*: governança, responsabilidades e recursos”.



Fluxograma 3 — Proposta de *Roadmap* para Implementação de Política Quântica Brasileira. Fonte: Elaborado pelo autor com base em European Commission (2024); Government of Canada (2023); European Commission (2024b); fundamentação teórica em Pressman e Wildavsky (1973); Taeihagh, Ramesh e Howlett (2021).

A Tabela 7 consolida um *framework* multidimensional de avaliação, combinando indicadores de ciência, formação de recursos humanos, base empresarial, propriedade intelectual e aplicação estratégica.

Tabela 7 — Indicadores Propostos para Avaliação de Políticas Quânticas Brasileiras

Categoria	Indicador	Meta 2030	Meta 2035	Método de Medição
Capacidade Científica	Publicações em journals A1	100/ano	200/ano	Base Scopus/WoS
Formação RH	Doutores formados/ano	50	100	Dados CAPES
Investimento	% PIB em pesquisa quântica	0,02%	0,05%	Orçamento MCTI
Aplicações Militares	Protótipos desenvolvidos	5	15	Relatórios MD
Parcerias Internacionais	Acordos de cooperação	10	25	Registros MRE
Base Industrial	Empresas com capacidade quântica	20	50	Survey MDIC
Patentes	Patentes depositadas	30	100	Base INPI

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ECIPE (2024); OECD (2023); fundamentação teórica em Vedung (1997).

Esses parâmetros derivam de *benchmarking* internacional e da base científica existente, permitindo acompanhar não apenas resultados finais, mas também a conversão entre produção científica, articulação institucional e desenvolvimento tecnológico aplicado. Isso é particularmente relevante no caso brasileiro, em que o problema central não é a inexistência de conhecimento, mas sua baixa tradução em capacidades estratégicas e industriais.

As evidências indicam que o Brasil dispõe de fundamentos científicos relevantes para capacidades quânticas aplicadas à defesa, mas enfrenta obstáculos de coordenação institucional, continuidade política e articulação estratégica. Como observam Taihagh, Ramesh e Howlett (2021), instrumentos tradicionais de política são insuficientes em áreas emergentes marcadas por alta incerteza e rápida transformação. A superação do descompasso entre produção científica, prioridades de defesa e capacidades estatais exige não apenas financiamento, mas arranjos institucionais capazes de sustentar coordenação, aprendizado e implementação ao longo do tempo.

Operacionalização do roadmap: governança, responsabilidades e recursos

A operacionalização efetiva de políticas para tecnologias emergentes exige especificação de instrumentos, atores e mecanismos de coordenação (Howlett 2019). Para tecnologias disruptivas como as quânticas, *frame-*

works tradicionais são insuficientes, demandando adaptações institucionais capazes de lidar com incertezas tecnológicas e coordenação intersetorial (Taeihagh, Ramesh e Howlett 2021). O sucesso depende da redução de pontos de decisão e alinhamento de incentivos entre atores com objetivos distintos (Pressman e Wildavsky 1973). A operacionalização proposta organiza-se em quatro fases — Estruturação, Institucionalização, Consolidação e Maturação — cujos atores, atribuições e entregas principais encontram-se sintetizados na Tabela 8.

Na Fase 1 (2025-2026), MCTI, Ministério da Defesa, Casa Civil e Relações Exteriores formulariam a Estratégia Nacional de Tecnologias Quânticas, revisariam documentos estratégicos de defesa e estabeleceriam parcerias internacionais. Trata-se da construção da janela de oportunidade política, voltada à coordenação inicial e definição de prioridades (Kingdon 1984). Experiências canadense e alemã sugerem que compromissos institucionais iniciais ampliam credibilidade e mobilização de atores.

Na Fase 2 (2026-2028), MCTI, Ministério da Defesa, IME, CBPF, SENAI Cimatec, FINEP e CNPq consolidariam infraestrutura organizacional e científica, criando instância nacional de coordenação, fortalecendo laboratórios e estruturando programas de formação. O *Quantum Flagship* europeu e o *National Quantum Initiative Act* demonstram que coordenação estável e concentração de competências reduzem dispersão e elevam capacidade de implementação.

Nas Fases 3 e 4 (2028-2035), a ênfase se deslocaria para resultados aplicados, com participação crescente da base industrial de defesa e formação de ecossistema *dual-use* envolvendo empresas, *startups* e universidades. Esse avanço depende de mecanismos de *feedback*, revisão progressiva e acumulação institucional (Sabatier e Jenkins-Smith 1993).

A viabilidade financeira do *roadmap* depende menos de aportes isolados do que de continuidade e diversificação de mecanismos de financiamento. Howlett (2019) demonstra que o desenho dos instrumentos de política, inclusive os de financiamento, condiciona diretamente a implementação e os resultados. Para tecnologias emergentes de maturação longa, Vedung (1997) ressalta a necessidade de investimentos contínuos capazes de atravessar ciclos políticos. O investimento total de R\$ 5 bilhões até 2034, anunciado pelo MCTI, forneceria base relevante, mas sua efetividade dependeria de previsibilidade orçamentária, diversificação de fontes e continuidade institucional. A distribuição dos recursos estimados, principais rubricas e mecanismos de captação por fase encontra-se sintetizada na Tabela 9.

Tabela 8 — Operacionalização do *roadmap*: atores, atribuições e entregas por fase

Fase	Período	Atores Principais	Atribuições Centrais	Entregas Principais	Referências Internacionais
1 - Estruturação	2025-2026	MCTI, MD, Casa Civil, MRE	Elaboração de estratégia nacional; revisão de documentos estratégicos; mapeamento de competências; negociação de parcerias internacionais	Estratégia Nacional de TQ publicada; PDN/END revisados; Mapa de competências nacionais; 2-3 acordos bilaterais assinados	Canadá (2023): National Quantum Strategy; Germany (Qureca 2025); e2 bi comprometidos
2 - Institucionalização	2026-2028	MD (coord.), MCTI, IME, ITA, CBPF, SENAI Cimatec, FINEP, CNPq	Criação do Centro Nacional de Defesa Quântica; estruturação de programas de pós-graduação; construção de infraestrutura laboratorial	Centro Nacional operacional; 3-5 programas mestrado/doutorado criados; 50 doutores/ano formados; Laboratórios Nível 1 instalados	EU (2024): Quantum Flagship €150M (2018-2020); USA (2018): National Quantum Initiative Act
3 - Consolidação	2028-2032	MD, empresas (Embraer, Atech, Mectron), startups, universidades	Desenvolvimento de protótipos; testes operacionais; transferência tecnológica; incubação de empresas	5-10 protótipos militares funcionais; 10-20 empresas quânticas criadas; 100 doutores/ano; 100-150 publicações/ano	Austrália: AU\$60M defesa; IBM (2024): quantum advantage 2029
4 - Maturação	2032-2035	MD (usuário final), empresas privadas (fornecedores), universidades (P&D contínuo)	Implementação operacional; escalonamento industrial; inserção em mercados internacionais	15 projetos militares operacionais; 20-50 empresas consolidadas; 30-100 patentes nacionais; 150-200 publicações/ano	Quantumium (2024): computação universal tolerante a falhas até 2030

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Government of Canada (2023); European Commission (2024); Qureca (2025); IBM (2024); U.S. Congress (2018); ECIPE (2024).

Tabela 9 — Recursos necessários e mecanismos de financiamento por fase

Fase	Investimento Estimado	% do Total	Principais Rubricas	Mecanismos de Captação	Fontes complementares	Exemplos Internacionais
1	R\$ 200 milhões	4%	Planejamento estratégico (R\$ 50M); mapeamento de competências (R\$ 50M); parcerias internacionais (R\$ 100M)	LOA vinculada (MCTI 60%, MD 40%); Emendas parlamentares	Cooperação internacional (acordos bilaterais)	Canada: CAD 360M inicial (Gov. Canada 2023)
2	R\$ 1,5 bilhão	30%	Infraestrutura física (R\$ 800M); equipamentos laboratoriais (R\$ 400M); bolsas pós-graduação (R\$ 300M)	FINEP (40%); FNDCT (30%); PPPs (20%); LOA (10%)	BNDES (infraestrutura); empresas privadas (cofinanciamento)	EU Flagship: €150M (2018-2020) para infraestrutura (EC 2024)
3-4	R\$ 3,3 bilhões	66%	Protótipos e testes (R\$ 1,5B); escalonamento industrial (R\$ 1,0B); contratos P&D (R\$ 800M)	Encomendas MD (35%); BNDES (25%); Incentivos fiscais (20%); Internacional (20%)	Venture capital; exportações; propriedade intelectual	USA DoD: >US\$100M aplicações militares (GovConWire 2025); Germany: €2,0B desenvolvimento (Qureca 2025)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Brasil (2023); Government of Canada (2023); European Commission (2024); GovConWire (2025); Qureca (2025).

A efetividade do *roadmap* dependeria da constituição de redes colaborativas entre academia, governo, indústria e parceiros internacionais. A governança de tecnologias emergentes exige desenho institucional sensível às especificidades tecnológicas, implicando formação de ecossistemas colaborativos (Taeihagh, Ramesh e Howlett 2021). No plano nacional, IME, CBPF, Senai Cimatec, Unicamp, USP e UFRJ apresentam competências complementares para pesquisa básica, aplicada, prototipagem e formação de recursos humanos, enquanto empresas da base industrial de defesa e *startups* assumiriam papel crescente na conversão dessas capacidades em aplicações tecnológicas.

No plano internacional, parcerias com Canadá, Alemanha e França, bem como participação em fóruns multilaterais, ampliariam acesso a infraestrutura, formação, financiamento e redes de pesquisa. No caso brasileiro, esse movimento pode ser lido à luz da autonomia pela diversificação (Vigevani e Cepaluni 2007): ampliar o leque de parceiros funciona como mecanismo de

redução de dependências externas. Contudo, a efetividade dessa estratégia dependeria de capacidades estatais de coordenação, pois, sem elas, a diversificação pode converter-se em dispersão institucional (Gomide e Pires 2014).

Os benefícios esperados, conforme indicadores propostos na Tabela 7, incluem fortalecimento de capacidades científicas, formação de recursos humanos, expansão da base empresarial, geração de aplicações *dual-use*, aumento da autonomia decisória e redução de dependências tecnológicas. Os beneficiários diretos seriam o sistema de defesa, a comunidade científica e a base industrial de defesa; indiretamente, setores civis associados a telecomunicações, computação, sensoramento e segurança cibernética.

Mecanismos de Governança e Resolução de Conflitos

A fragmentação institucional identificada na seção 4.3 exigiria mecanismos formais que transcendessem a coordenação voluntária. Tecnologias emergentes demandam um “mix assíncrono de instrumentos” e capacidades políticas antecipatórias (Howlett et al. 2018), enquanto a superação de silos burocráticos requer estruturas formais de coordenação dotadas de autoridade para arbitrar conflitos (Peters 2018). O modelo proposto estrutura-se em três níveis complementares de governança.

No nível estratégico, uma instância interministerial de alto nível asseguraria direção política, compatibilização entre prioridades e resolução de impasses. No nível tático, uma comissão técnica paritária operacionalizaria diretrizes, avaliaria projetos, definiria prioridades anuais e mediaria controvérsias relativas a financiamento e coordenação. No nível operacional, a instância executora alocaria recursos, acompanharia metas, monitoraria indicadores e articulava pesquisa, desenvolvimento e aplicação.

Os mecanismos de resolução de conflitos incluiriam protocolos de compartilhamento de dados, regras de propriedade intelectual, arbitragem técnica e prestação de contas compatível com a sensibilidade das informações. O equilíbrio entre transparência e segurança nacional exigiria relatórios periódicos, auditorias e supervisão institucional, preservando conteúdos cujo sigilo seja justificável. Esse ponto dialoga com Vedung (1997), indicando que mecanismos de acompanhamento dependem de arranjos capazes de distinguir entre transparência compatível com *accountability* e reserva informacional justificável.

A sustentabilidade política do *roadmap* dependeria de institucionalização normativa e orçamentária vinculada a instrumentos plurianuais, bases legais duradouras e mecanismos de retenção de capacidades humanas e institucionais, evitando a descontinuidade observada em outras políticas tecnológicas de longo prazo.

CONCLUSÃO

A análise das políticas públicas de tecnologias quânticas na defesa brasileira evidencia desalinhamento estratégico relevante: fundamentos científicos sólidos não se traduzem automaticamente em autonomia tecnológica, dada a fragilidade dos mecanismos de conversão de competências acadêmicas em capacidades estatais coordenadas. A fragmentação institucional e a ausência de diretrizes específicas nos documentos de alto nível (PND e END) limitam a capacidade do Estado de atuar como indutor de inovação em área de fronteira e natureza intrinsecamente dual.

A questão central do estudo — desafios e oportunidades para as políticas quânticas de defesa no Brasil — é respondida pela identificação de três dimensões interdependentes. Primeiro, a fragmentação institucional dificulta a coordenação entre o sistema nacional de C&T e as necessidades estratégicas de defesa. A ausência de menções específicas a tecnologias quânticas em documentos estratégicos evidencia limitações de antecipação tecnológica, contrastando com países líderes. O diagnóstico confirma essa lacuna ao revelar o contraste entre capacidade científica (8/10) e aplicação em defesa (2/10), com pontuações críticas em todas as etapas do ciclo de políticas públicas.

Segundo, as oportunidades decorrem da convergência entre busca por autonomia decisória, dimensões continentais do país e investimento de R\$ 5 bilhões projetado até 2034. A análise comparativa revela que países de capacidade intermediária, como Canadá (investimento de US\$ 0,73 bilhão) e Austrália, estruturaram respostas relevantes por meio de especialização e coordenação interministerial efetiva, sugerindo a utilidade de abordagens focalizadas que maximizam impacto pela concentração em nichos estratégicos.

Terceiro, o enfrentamento dos desafios aponta para a necessidade de aperfeiçoamento dos processos de formulação e implementação tecnológica. O ciclo de políticas evidencia que instrumentos tradicionais são insuficientes para tecnologias emergentes, indicando a importância de desenvolver capacidades institucionais específicas, incluindo articulação civil-militar e coordenação interagências. O *roadmap* proposto em quatro fases até 2035 organiza sequência temporal plausível, na qual a criação de um Centro Nacional de Defesa Quântica (2026-2028) surge como intervenção estrutural para reduzir complexidade. Os cenários prospectivos sugerem que o Brasil pode fortalecer seu posicionamento até 2035, desde que haja sustentabilidade de financiamento e marcos institucionais duradouros, monitorados pela matriz de indicadores proposta.

Em última análise, as tecnologias quânticas constituem tema de relevância estratégica para países que buscam autonomia decisória. Para o

Brasil, o contexto ainda permite escolhas institucionais relevantes, mas sua exploração depende da capacidade de construir mecanismos estáveis de coordenação entre políticas científicas, industriais e de defesa. O desafio central consiste em converter capacidade científica em capacidades tecnológicas coordenadas e duradouras, reduzindo dependência tecnológica em setores sensíveis.

DECLARAÇÃO DE FINANCIAMENTO

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Ministério da Defesa (através do Programa Pró-Defesa V – Rede IATQ, processo 88887.961681/2024-00), e à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) (através dos projetos PDI-DQBRN/1545-22, CMLabIME/0160-22 e Quantum II/3310-24) pelo financiamento recebido.

REFERÊNCIAS

- Alsina Júnior, João Paulo Soares. 2009. “O poder militar como instrumento da política externa brasileira contemporânea.” *Revista Brasileira de Política Internacional* 52, no. 2: 173–91. doi.org/10.1590/S0034-73292009000200010.
- Alsina Júnior, João Paulo Soares. 2015. *Ensaio de Grande Estratégia Brasileira*. Rio de Janeiro: Editora FGV.
- Amarante, José Carlos Albano do. 2013. *A base industrial de defesa brasileira*. Brasília: Ipea.
- Arretche, Marta. 1998. “Tendências no estudo sobre avaliação.” In *Avaliação de políticas sociais: Uma questão em debate*, 3. ed., editado por Elizabeth Melo Rico: 29–39. São Paulo: Cortez.
- Arretche, Marta. 2001. “Instituições e política no controle do gasto público.” *Dados* 44, no. 2: 331–60.
- Azevedo, Carlos Eduardo Franco. 2018. “Os elementos de análise da cultura de inovação no setor de Defesa e seu modelo tridimensional.” *Coleção Meira Mattos: Revista das Ciências Militares* 12, no. 45: 47–68.
- Azevedo, Carlos Eduardo Franco, Gabriela Alves Borba e Laércio Eduardo de Araújo. 2021. “Desafios para a política de inovação no setor de defesa brasileiro: óbices e barreiras culturais e estruturais.” *Revista da Escola de Guerra Naval* 27, no. 1.

Baumgartner, Frank R. e Bryan D. Jones. 1993. *Agendas and Instability in American Politics*. Chicago: University of Chicago Press.

Bitencourt, Luiz e Alcides Costa Vaz (Eds.). 2009. *Estudos estratégicos e defesa nacional: Reflexões sobre metodologia*. São Paulo: Hucitec.

Borrás, Susana, e Charles Edquist. 2013. “The choice of innovation policy instruments.” *Technological Forecasting and Social Change* 80, no. 8: 1.513–22.

Börzel, Tanja A. 1998. “Organizing Babylon: On the different conceptions of policy networks.” *Public Administration* 76, no. 2): 253–73.

Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. 2023. *MCTI e Embrapii vão investir R\$ 60 milhões em centro de tecnologia quântica*. Brasília: MCTI.

Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. 2025. *Brasil avança na corrida das tecnologias quânticas*. Brasília: MCTI.

Brasil. Ministério da Defesa. 2012. *Livro Branco de Defesa Nacional*. Brasília: MD.

Brasil. Ministério da Defesa. 2018. *Política Nacional da Indústria de Defesa*. Brasília: MD.

Brasil. Ministério da Defesa. 2020a. *Estratégia Nacional de Defesa*. Brasília: MD.

Brasil. Ministério da Defesa. 2020b. *Política de Defesa Nacional*. Brasília: MD.

Brigagão, Clóvis e Domício Proença Júnior (Eds.). 2002. *Brasil e o mundo: Novas visões sobre política externa e defesa*. Rio de Janeiro: Francisco Alves.

Cairney, Paul. 2016. *Understanding Public Policy: Theories and Issues*. 2. ed. London: Red Globe Press.

Center for Strategic and International Studies. 2025. *Global quantum technology competition report*. Washington, DC: CSIS Technology Policy Program.

Cooper, Andrew F., Richard Higgott e Kim Richard Nossal. 1993. *Relocating Middle Powers: Australia and Canada in a Changing World Order*. Vancouver: UBC Press.

Dagnino, Renato. 2010. “A indústria de armamentos brasileira: Uma tentativa de avaliação.” *Revista da Escola Superior de Guerra* 25, no. 52: 131–58.

Degen, Christian L., F. Reinhard e P. Cappellaro. 2017. “Quantum sensing.” *Reviews of Modern Physics* 89, no. 3: 035002. doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002.

Dunlop, Claire A. 2014. “The possible experts: How epistemic communities negotiate barriers to knowledge use in ecosystems services policy.” *Environment and Planning C: Government and Policy* 32, no. 2: 208–28.

European Centre for International Political Economy. 2024. *Benchmarking quantum technology performance: Governments, industry, academia and their role in shaping our technological future*. Brussels: ECIPE.

European Commission. 2024a. *Strategic research and industry agenda SRIA 2030: Roadmap and quantum ambitions over this decade*. Brussels: Publications Office of the European Union.

European Commission. 2024b. *Recommendation on a coordinated implementation roadmap for the transition to post-quantum cryptography*. COM (2024) 553 final. Brussels: European Commission.

Gomide, Alexandre de Ávila e Roberto Rocha C. Pires. 2014. “Capacidades estatais e democracia: A abordagem dos arranjos institucionais para análise de políticas públicas.” In *Capacidades estatais e democracia: arranjos institucionais de políticas públicas*, editado por Alexandre de Ávila Gomide e Roberto Rocha C. Pires: 15–30. Brasília: Ipea.

Gonçalves, Pascoal Teófilo Carvalho. 2009. “Potências médias na economia política internacional: parâmetros analíticos da escolha racional.” *Relações Internacionais no Mundo Atual* 2, no. 8.

GovConWire. 2025. *Inside the quantum-powered defense landscape of the future*. www.govconwire.com/2025/01/future-quantum-defense-applications/.

Government of Canada. 2023. *National Quantum Strategy*. Ottawa: Innovation, Science and Economic Development Canada.

Haas, Peter M. 1992. “Introduction: Epistemic communities and international policy coordination.” *International Organization* 46, no. 1: 1–35. doi.org/10.1017/S0020818300001442.

HM Government. 2023. *National Quantum Strategy*. London: Department for Science, Innovation and Technology.

Howlett, Michael. 2019. *Designing Public Policies: Principles and Instruments*. 2. ed. London: Routledge.

Howlett, Michael, e Joshua Newman. 2013. “Policy capacity for climate change in federal systems: The cases of Canada and the EU.” *Review of Policy Research* 30, no. 1: 1–18.

- Howlett, Michael e M. Ramesh. 1995. *Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems*. Oxford: Oxford University Press.
- Howlett, Michael e M. Ramesh. 2003. *Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems*. 2. ed. Oxford: Oxford University Press.
- Howlett, Michael, M. Ramesh e Anthony Perl. 2009. *Studying Public Policy: Policy Cycles and Policy Subsystems*. 3. ed. Oxford: Oxford University Press.
- Howlett, Michael, M. Ramesh, Xun Wu e Scott A. Fritzen. 2018. *The Public Policy Primer: Managing the Policy Process*. London: Routledge.
- Hupe, Peter L. 2011. "The thesis of incongruent implementation: Revisiting Pressman and Wildavsky." *Public Policy and Administration* 26, no. 1: 63–80.
- IBM Corporation. 2024. *IBM quantum roadmap*. www.ibm.com/roadmaps/quantum/
- Johnston, Alastair Iain. 1995. "Thinking about strategic culture." *International Security* 19, no. 4: 32–64. www.jstor.org/stable/2539119.
- Keohane, Robert O. 1969. "Lilliputians' dilemmas: Small states in international politics." *International Organization* 23, no. 2: 291–310.
- Kingdon, John W. 1984. *Agendas, Alternatives, and Public Policies*. Boston: Little, Brown.
- Kingdon, John W. 2003. *Agendas, Alternatives, and Public Policies*. 2. ed. New York: Longman.
- Krelina, Michal. 2021. "Quantum technology for military applications." *EPJ Quantum Technology* 8, no. 1: 24. doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y.
- Kuhlmann, Stefan e Arie Rip. 2018. "Next-generation innovation policy and grand challenges." *Science and Public Policy* 45, no. 4: 448–54. doi.org/10.1093/scipol/scy011.
- Lasswell, Harold D. 1956. *The Decision Process: Seven Categories of Functional Analysis*. College Park: University of Maryland Press.
- Lindblom, Charles E. 1959. "The science of 'muddling through'." *Public Administration Review* 19, no. 2: 79–88.
- Lindblom, Charles E. 1979. "Still muddling, not yet through." *Public Administration Review* 39, no. 6: 517–26.

Lipsky, Michael. 1980. *Street-Level Bureaucracy: Dilemmas of the Individual in Public Services*. New York: Russell Sage Foundation.

Matland, Richard E. 1995. "Synthesizing the implementation literature: The ambiguity-conflict model of policy implementation." *Journal of Public Administration Research and Theory* 5, no. 2: 145–74.

Mazzucato, Mariana. 2018. "Mission-oriented innovation policies: Challenges and opportunities." *Industrial and Corporate Change* 27, no. 5: 803–15. doi.org/10.1093/icc/dty034.

Mercator Institute for China Studies. 2024. *China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up*. Berlin: Merics.

Merics 2024: Mercator Institute for China Studies. 2024. *China's long view on quantum tech has the US and EU playing catch-up*. Berlin: Merics.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. *Quantum Computing: Progress and Prospects*. Washington, DC: National Academies Press. doi.org/10.17226/25196.

U.S. Congress. 2018. National Quantum Initiative Act. Public Law No. 115-368. Washington, DC: U.S. Government Publishing Office.

Oliveira, Eliézer Rizzo de. 2005. *Democracia e Defesa Nacional*. Barueri, SP: Manole.

Oliveira, Eliézer Rizzo de. 2017. *Democracia e defesa nacional: A criação do Ministério da Defesa na Presidência de FHC*. Barueri: Manole.

Organisation for Economic Co-operation and Development. 2023. *Emerging technology governance and policy*. Paris: OECD Publishing.

Penha, Eli Alves. 2011. *Relações Brasil-África e geopolítica do Atlântico Sul*. Salvador: Edufba.

Peters, B. Guy. 2018. *American Public Policy: Promise and Performance*. 11. ed. Washington, DC: CQ Press.

Pierson, Paul. 2000. "Increasing returns, path dependence, and the study of politics." *American Political Science Review* 94, no. 2: 251–67.

Pralle, Sarah B. 2003. "Venue shopping, political strategy, and policy change: The internationalization of Canadian forest advocacy." *Journal of Public Policy* 23 (3): 233–260.

Pressman, Jeffrey L. e Aaron Wildavsky. 1973. *Implementation: How Great Expectations in Washington Are Dashed in Oakland*. 3rd ed. Berkeley: University of California Press.

Quantinuum. 2024. *Quantinuum roadmap to fault-tolerant quantum computing*. Quantinuum Corporation.

Qureca. 2025. *Quantum initiatives worldwide 2025*. www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/.

Revista Fórum. 2025. “Brasil vai investir R\$ 5 bilhões em tecnologia quântica até 2034, diz MCTI.” *Revista Fórum* (Abril). revistaforum.com.br/brasil/2025/4/16/brasil-vai-investir-r-bilhes-em-tecnologia-quntica-ate-2034-diz-mcti-177558.html.

Rhodes, R. A. W. 1997. *Understanding Governance: Policy Networks, Governance, Reflexivity and Accountability*. Buckingham: Open University Press.

Ruttan, Vernon W. 2006. *Is War Necessary for Economic Growth? Military Procurement and Technology Development*. New York: Oxford University Press.

Sabatier, Paul A. e Hank C. Jenkins-Smith. 1993. *Policy Change and Learning: An Advocacy Coalition Approach*. Boulder: Westview Press.

Sabatier, Paul A. e Christopher M. Weible. 2007. *Theories of the Policy Process*. 2nd ed. Boulder: Westview Press.

Saint-Pierre, Héctor Luis e Érica Cristina Aparecida Winand (Eds.). 2018. *A política de defesa do Brasil no século XXI: Revisitando a Estratégia Nacional de Defesa*. Brasília: Ipea.

Scarani, Valerio, Helle Bechmann-Pasquinucci, Nicolas J. Cerf, Miloslav Dušek, Norbert Lütkenhaus e Momtchil Peev. 2009. “The security of practical quantum key distribution.” *Reviews of Modern Physics* 81, no. 3: 1.301–50. doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1301.

Secches, Daniela Vieira, Javier Vadell e Leonardo Ramos. 2020. “Potências médias e potências emergentes na economia política internacional: uma aproximação teórico-conceitual.” *Sociedade e Cultura* 23.

Silva, Ana Luísa Rodrigues da. 2015. *Do otimismo liberal à globalização assimétrica: A política externa do governo Fernando Henrique Cardoso (1995-2002)*. Curitiba: Juruá.

Taeihagh, Araz, M. Ramesh e Michael Howlett. 2021. “Assessing the regulatory challenges of emerging disruptive technologies.” *Regulation & Governance* 15, no. 4: 1.009–19.

The Quantum Insider. 2025a. *Quantum computing roadmaps: A look at the maps and predictions of major quantum players*. thequantuminsider.com/2025/05/16/quantum-computing-roadmaps-a-look-at-the-maps-and-predictions-of-major-quantum-players/.

The Quantum Insider. 2025b. *TQI 2024 annual report: Quantum industry faces challenges as transformative potential, commercialization beckon*.” thequantuminsider.com/2025/01/15/tqi-2024-annual-report-quantum-industry-faces-challenges-as-transformative-potential-commercialization-beckon/.

U.S. Congress. 2018. *National Quantum Initiative Act*. Public Law No. 115–368. Washington, DC: U.S. Government Publishing Office.

Vedung, Evert. 1997. *Public Policy and Program Evaluation*. New Brunswick: Transaction Publishers.

Vigevani, Tullo, e Gabriel Cepaluni. 2007. “A política externa de Lula da Silva: a estratégia da autonomia pela diversificação.” *Contexto Internacional* 29, no. 2): 273–335. doi.org/10.1590/S0102-85292007000200002.

Weiss, Linda. 2014. *America Inc.? Innovation and Enterprise in the National Security State*. Ithaca: Cornell University Press.

TECNOLOGIAS QUÂNTICAS NA DEFESA DO BRASIL: DESAFIOS, OPORTUNIDADES E ROADMAP

RESUMO

Este estudo analisa desafios e oportunidades para a implementação de políticas públicas de tecnologias quânticas com implicações para a defesa do Brasil. O problema central é a fragmentação institucional que impede a conversão da expressiva capacidade científica nacional em aplicações estratégicas coordenadas, em contraste com países líderes (EUA, China, Alemanha, Reino Unido, Canadá) que já incorporaram essas tecnologias em suas estratégias nacionais. A pesquisa adota abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, combinando análise documental de estratégias nacionais de defesa, revisão bibliográfica e estudo comparativo internacional, estruturados pelo modelo do ciclo de políticas públicas. Os resultados revelam ausência de menções específicas a tecnologias quânticas nos documentos estratégicos brasileiros (0% vs. 80% da média internacional), deficiências em todas as etapas do ciclo político e descompasso entre capacidade científica e aplicação estratégica. O artigo sustenta que, em contextos de alta incerteza tecnológica e baixa coordenação intersectorial, a Defesa pode ser examinada como arranjo institucional relevante de indução de demanda e coordenação, sem que isso implique primazia automática no desenvolvimento nacional do setor. A contribuição é dupla: diagnóstico integrado dessa desconexão e roadmap de quatro fases até 2035, incluindo criação de um Centro Nacional de Defesa Quântica, como referência para países de capacidade intermediária.

Palavras-chave: Tecnologias Quânticas, Defesa, Políticas Públicas, Soberania Tecnológica.

ABSTRACT

This study analyzes challenges and opportunities for implementing public policies on quantum technologies with implications for defense in Brazil. The central problem is institutional fragmentation hindering the conversion of national scientific capacity into coordinated strategic applications, contrasting with leading countries (USA, China, Germany, UK, Canada) that have incorporated these technologies into national strategies. The research adopts a qualitative, exploratory, and descriptive approach, combining documentary analysis of defense strategies, literature review, and international comparative study, structured by the public policy cycle model. Results reveal no specific mentions of quantum technologies in Brazilian strategic documents (0% vs. 80% international average), deficiencies across all policy cycle stages, and a mismatch between scientific capacity and strategic application. The article argues that, in contexts marked by high technological uncertainty and low intersectoral coordination, defense may be examined as a relevant institutional arrangement for demand induction and coordination, without implying automatic primacy in the national development of the sector. The contribution is twofold: integrated diagnosis of this disconnect and a four-phase roadmap to 2035, including a National Quantum Defense Center, as a reference for intermediate-capacity countries.

Keywords: Quantum Technologies, Defense, Public Policies, Technological Sovereignty.

Recebido em 13/10/2026. Aceito para publicação em 30/04/2026.