ARTÍCULO DOI 10.52781/cmm.a204

Tecnologías cuánticas y defensa nacional: el papel de las instituciones militares en la cooperación civil-militar en Brasil

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

Resumen: Esta investigación analiza cómo las instituciones militares brasileñas contribuyen a la cooperación civil-militar en el desarrollo de tecnologías cuánticas aplicadas a la defensa nacional. El objetivo general es comprender el papel de las Fuerzas Armadas en la construcción de esta relación en el sector de la defensa. Se busca 1) presentar cómo las instituciones desarrollan modelos de aplicación de las tecnologías cuánticas, 2) analizar el funcionamiento de las iniciativas existentes y 3) proponer recomendaciones para fortalecer la cooperación civil-militar como estrategia de desarrollo tecnológico. La metodología es cualitativa, de carácter exploratorio, y se basa en el análisis documental (de la Política Nacional de Defensa y la Estrategia Nacional de Defensa), la revisión bibliográfica y la recopilación de datos institucionales de actores como el Instituto Militar de Ingeniería (IME), la Escuela de Comando y Estado Mayor del Ejército (ECEME), la Red Nacional de Investigación Cuántica (Rede Rio Quântica) y el proyecto Inteligencia Artificial y Tecnologías Cuánticas (IATQ). El estudio contextualiza la evolución de las tecnologías cuánticas, analiza sus aplicaciones militares emergentes y compara las estrategias adoptadas por Estados Unidos y China. Los resultados indican que las instituciones militares son actores estratégicos en la articulación del ecosistema cuántico brasileño.

Palabras clave: Tecnologías cuánticas; Cooperación civil-militar; Defensa Nacional; Innovación en materia de defensa; Triangulación de fuentes.

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

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

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

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

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

Recibido: 30 jun. 2025
Aprobado: 09 abr. 2026

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

Creative Commons Attribution Licence

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, las innovaciones tecnológicas han contribuido a cambios en la estructura de las relaciones entre los Estados. Desde la pólvora hasta la energía nuclear y desde el radar hasta la inteligencia artificial (IA), la incorporación de nuevas tecnologías a los aparatos militares ha marcado un antes y un después en las formas de hacer la guerra y en los parámetros de la defensa. En este contexto, el campo de las tecnologías cuánticas (TQ) tiene implicaciones para la soberanía de la información, la resiliencia cibernética y la superioridad de los Estados.

Las TQ se basan en principios fundamentales de la mecánica cuántica, como la superposición, el entrelazamiento y el principio de incertidumbre, que desafían las intuiciones clásicas de la física (Smith III, 2020). Estas propiedades abren el camino a una nueva gama de aplicaciones en el ámbito militar, entre las que se incluyen sensores de alta precisión, sistemas de navegación independientes del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), redes de comunicación inviolables y computadoras con una capacidad de procesamiento exponencial. Aunque muchas de estas aplicaciones aún se encuentran en etapas iniciales de desarrollo, el ritmo acelerado de la investigación y la competencia geopolítica por el liderazgo tecnológico indican que la ventana de oportunidad para la inserción estratégica es estrecha.

En este panorama tecnológico, el sector de la defensa se caracteriza por ser impulsor y demandante de soluciones cuánticas, debido a la naturaleza sensible de la información que maneja (Brito; Ferreira; Chaves, 2023). La búsqueda de la superioridad de decisión, de situación y cibernética lleva a las Fuerzas Armadas de países como Estados Unidos (EE. UU.) y China a invertir en la explotación militar de estas tecnologías, incluso mediante la creación de centros especializados, programas de financiamiento estratégico y mecanismos de protección de la base industrial.

En el contexto brasileño, aunque la agenda de la tecnología cuántica todavía se encuentra en una fase incipiente, se observa la movilización de actores estratégicos, como el Instituto Militar de Ingeniería (IME), el Comando de Defensa Cibernética (ComDCiber), la Escuela de Comando y Estado Mayor del Ejército (ECEME) y la Red Nacional de Investigación Cuántica (Rede Rio Quântica) (Brasil, 2025d). Estas instituciones han buscado, a través de proyectos, programas de capacitación y alianzas con universidades, impulsar el desarrollo nacional en esta área. Sin embargo, persisten los desafíos relacionados con la interoperabilidad —entendida como la capacidad de diferentes sistemas y organizaciones para colaborar entre sí, lo que permite el intercambio de información de manera eficiente e integrada (Mello, 2015)—, siendo la cooperación civil-militar uno de los ejes centrales para su viabilidad.

Dicho esto, esta investigación busca responder a la siguiente pregunta: ¿cómo contribuyen las instituciones militares brasileñas a la construcción de la cooperación civil-militar en el desarrollo de tecnologías cuánticas aplicadas a la defensa nacional? El objetivo general consiste en analizar el papel de estas instituciones militares en la relación entre civiles y militares en el ámbito del desarrollo de las tecnologías de la comunicación en el sector de la defensa de Brasil. Para ello, se proponen tres objetivos específicos: 1) presentar cómo las instituciones han desarrollado modelos para el uso de las TQ en el sector de la defensa; 2) examinar el funcionamiento de las propuestas existentes en el ámbito de la defensa; y 3) formular recomendaciones para fortalecer la cooperación civil-militar como estrategia de desarrollo tecnológico en el sector.

Esta investigación adopta un enfoque cualitativo de carácter exploratorio (Godoy, 1995; Gil, 2008). El diseño metodológico da prioridad a la triangulación de fuentes como estrategia para aumentar la solidez analítica (Abdalla et al., 2018; Azevedo et al., 2013), estructurada en tres ejes: análisis documental, revisión bibliográfica y recopilación de datos institucionales.

El primer eje comprende el análisis de documentos oficiales de planificación estratégica de la defensa nacional, seleccionados por su relevancia normativa y por el papel estructurante que desempeñan en la orientación de las políticas públicas del sector. Se analizaron la Estrategia Nacional de Defensa (END) en sus ediciones de 2008, 2012 y 2020, y la Política Nacional de Defensa (PND) en sus ediciones de 2012 y 2020. El análisis se centró en identificar referencias a tecnologías estratégicas, capacitación científica y acuerdos de cooperación civil-militar.

El segundo eje consistió en una revisión bibliográfica en las áreas de innovación en defensa, relaciones entre civiles y militares y tecnologías cuánticas, con búsquedas realizadas en las bases de datos Web of Science, Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, el Portal de Revistas de CAPES y Google Académico. Los criterios de selección dieron prioridad a las publicaciones que articularan las dimensiones tecnológicas, institucionales y de seguridad nacional, con énfasis en trabajos empíricos y comparativos. La búsqueda bibliográfica utilizó *strings* estructurados en inglés y portugués: "*Quantum Technologies"; "National Defense"; "Civil-military cooperation"; "Defense innovation"; "Brazilian defense policy"*.

El tercer eje consistió en la recopilación de datos en instituciones militares y científicas brasileñas directamente involucradas en tecnologías cuánticas, a saber: el IME, el ECEME, la Red Rio Cuántica y el proyecto IATQ. Las fuentes consultadas incluyen documentos institucionales, informes de proyectos y material técnico de acceso público.

La triangulación se basó en la convergencia y el contraste entre estos tres ejes: los documentos oficiales proporcionaron el marco normativo; la literatura, el marco analítico; y los datos institucionales, la evidencia empírica sobre las iniciativas en curso. Los ejemplos internacionales que se mencionan a lo largo del texto cumplen una función analítica ilustrativa, y se utilizan para contextualizar las decisiones y las deficiencias del modelo brasileño frente a experiencias consolidadas en otros países, sin constituir un estudio de caso en profundidad.

Aunque el modelo de la Triple Hélice ofrece una perspectiva analítica importante para comprender esta dinámica, la estructuración de la cooperación civil-militar en el ámbito de las tecnologías cuánticas no se limita a ese marco. Existen otras formas de innovación, entre ellas los modelos lineales de transferencia de tecnología y las iniciativas impulsadas directamente por el sector privado. Sin embargo, en el caso específico de las TQ aplicadas a la defensa, caracterizadas como tecnologías críticas y sensibles, se observa una tendencia hacia una mayor coordinación entre el Estado, las instituciones militares y el ámbito académico, dada la complejidad técnica, los elevados costos y las implicaciones estratégicas que conllevan (Etzkowitz; Zhou, 2017).

La importancia de este estudio radica en la necesidad de comprender cómo la modernización de la defensa nacional puede impulsarse mediante la colaboración entre el ámbito académico, la industria y el gobierno. La consolidación de las capacidades cuánticas exige una visión a largo plazo, inversiones sostenidas y sinergia entre los distintos sectores del Estado. De este modo, al analizar el papel de las instituciones militares en esta interfaz, este trabajo contribuye al debate sobre la construcción de una base nacional de defensa tecnocientífica autóctona.

No obstante, se observa una laguna en la literatura especializada: los estudios sobre las tecnologías cuánticas aplicadas a la defensa se centran predominantemente en las estrategias de las grandes potencias, como Estados Unidos y China, sin examinar el papel específico de las instituciones militares de los países en desarrollo en la construcción de ecosistemas nacionales de innovación cuántica (Krelina, 2021; Parker *et al*., 2022).

Al mismo tiempo, la literatura sobre la cooperación civil-militar en Brasil se centra en sectores ya consolidados, como el nuclear, el aeroespacial y el cibernético, sin abordar de manera sistemática las tecnologías cuánticas como un vector emergente de esta relación (Hing, 2010; Moura, 2024). La intersección entre estas dos agendas, el papel de las instituciones militares brasileñas en la promoción de la cooperación civil-militar en el ámbito cuántico, sigue siendo un tema poco explorado en la producción académica nacional e internacional. Es en este vacío donde se inserta este trabajo al proponer un análisis de las iniciativas, los arreglos institucionales y los desafíos que dan forma a esta cooperación en el contexto brasileño.

2 LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS Y EL SECTOR DE DEFENSA

A finales del siglo XIX, la física clásica se enfrentaba a debates teóricos que no podían resolverse con herramientas conceptuales. Fenómenos como el espectro de la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico y la estabilidad de los átomos revelaron lagunas en las teorías existentes. Fue en este contexto que Planck (1858-1947), en 1900, propuso que la energía no se emitía de manera continua, sino en paquetes discretos denominados cuantos (Carson, 2000).

En 1905, Einstein (1879-1955) amplió esta idea al explicar el efecto fotoeléctrico, demostrando el comportamiento corpuscular de la luz y dando lugar al concepto del fotón. Ya en 1913, Bohr (1885-1962) incorporó la cuantización al modelo atómico, sugiriendo que los electrones orbitaban alrededor del núcleo en niveles discretos y que sus transiciones explicaban los espectros atómicos (Kragh, 1999).

Entre 1925 y 1928, la mecánica cuántica fue formulada por Heisenberg (1925), Schrödinger (1926) y Dirac (1928). Heisenberg (1925) desarrolló la mecánica matricial, mientras que Schrödinger (1926) formuló la ecuación de onda que lleva su nombre; por su parte, Dirac (1928) unificó la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad especial. Estas contribuciones sentaron las bases formales de la primera revolución cuántica, al introducir conceptos como la superposición, el entrelazamiento y el principio de incertidumbre; este último es el responsable de eliminar la previsibilidad absoluta del universo físico (Chibeni, 1992; Jammer, 1966).

La Segunda Revolución Cuántica marca el inicio de una nueva era centrada en la manipulación de los estados individuales de las partículas, especialmente el entrelazamiento, que se ha convertido en el pilar de las innovaciones actuales en computación cuántica, criptografía cuántica y metrología de alta precisión (Intonti, 2024). A partir de la década de 1980, Feynman (1918-1988) argumentó que solo un sistema regido por las leyes cuánticas podría simular de manera eficiente otro sistema cuántico, sentando las bases para las computadoras cuánticas e influyendo en el uso de la superposición y el entrelazamiento en tareas computacionales (Caldeira, 2018). Al mismo tiempo, Bennett y Brassard propusieron, en 1984, el protocolo BB84, que estableció los fundamentos de la criptografía cuántica al demostrar que la mecánica cuántica podía garantizar comunicaciones absolutamente seguras, consolidándose como una de las áreas centrales de esta nueva revolución (Rigolin; Rieznik, 2005).

El auge de las TQ en el ámbito de la defensa representa una transición estratégica silenciosa, pero profunda, cuyas implicaciones van más allá de la mera introducción de nuevos equipos y replantean la doctrina de las operaciones terrestres. Se trata de una transformación en la base informativa, sensorial y decisoria de las Fuerzas Armadas, con el potencial de redefinir los parámetros operativos actuales. La computación cuántica, los sensores ultrasensibles y las comunicaciones

inviolables surgen como vectores de superioridad funcional, elevando exponencialmente la precisión, la velocidad y la seguridad de los sistemas militares (Krelina, 2021).

En el ámbito de las comunicaciones, la Quantum Key Distribution (QKD) garantiza niveles de seguridad sin precedentes al permitir la detección de cualquier intento de interceptación, desplazando la lógica de la criptografía de un enfoque basado en la complejidad computacional (Krelina, 2021). Protocolos como el QKD garantizan la detección inmediata de cualquier intento de interceptación, lo que ofrece una ventaja estratégica significativa en escenarios operativos delicados (Neumann; van Heesch; de Graaf, 2023).

Sin embargo, cabe señalar que la incorporación de estas tecnologías plantea desafíos. La vulnerabilidad de los sistemas orbitales ante las armas de energía dirigida y las interferencias electromagnéticas refuerza la necesidad de contar con arquitecturas robustas y sistemas defensivos sofisticados. Además, el avance de los procesadores cuánticos capaces de descifrar códigos convencionales exige inversiones en criptografía poscuántica y protocolos de seguridad resilientes. Por lo tanto, a pesar de que muchas de estas innovaciones se encuentran en etapa experimental, su potencial exige un monitoreo continuo (Krelina, 2023).

En este ámbito de la carrera tecnológica, Estados Unidos y China se posicionan como líderes mundiales. Según lo señalado por Julienne (2024), China ha promovido la aplicación de la QKD, por ejemplo, a través de la red conocida como Jing-Hu Trunk Line, considerada la mayor infraestructura terrestre de comunicación cuántica del mundo. Esta red conecta ciudades estratégicas como Pekín y Shanghái a lo largo de más de 2.000 kilómetros de fibra óptica, lo que permite la distribución segura de claves criptográficas basadas en principios de la mecánica cuántica, como el entrelazamiento y la imposibilidad de realizar mediciones sin perturbar el sistema. En la práctica, esto significa que cualquier intento de interceptar la comunicación puede detectarse de inmediato, lo que eleva significativamente el nivel de seguridad de las transmisiones. Además de su alcance, la Jing-Hu Trunk Line se integra con otras iniciativas chinas, como el satélite cuántico Micius, formando una arquitectura híbrida (terrestre y espacial) orientada a la construcción de una infraestructura nacional de comunicaciones inviolables. Este avance coloca a China a la vanguardia de las comunicaciones cuánticas y pone de manifiesto el uso estratégico de estas tecnologías para garantizar la soberanía de la información, la protección de los datos sensibles y la ventaja geopolítica en el ámbito cibernético. Importantes empresas privadas, como Alibaba, han abandonado sus divisiones cuánticas, mientras que el gobierno intenta centralizar el sector a través de empresas estatales, como el recién creado China Telecom Quantum Group. A esto se suma el creciente aislamiento provocado por las tensiones geopolíticas y las sanciones occidentales, que dificultan el acceso a insumos estratégicos, como los refrigeradores de dilución (Julienne, 2024).

Estados Unidos ha adoptado una estrategia sólida para el desarrollo de la base industrial cuántica. Según datos de Estados Unidos (2021), en el marco de la National Quantum Initiative, el país ha invertido en Investigación y Desarrollo (I+D), con un financiamiento que superó los 700 millones de dólares en 2021. Estas iniciativas están a cargo de agencias civiles, como la National Science Foundation (NSF); de organismos de defensa, como la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA); y de la comunidad de inteligencia, como la National Security Agency (NSA).

En el sector privado, Estados Unidos ha promovido una red integrada por más de 180 empresas. Algunas de ellas forman parte de consorcios con universidades y laboratorios nacionales, como el Quantum Economic Development Consortium (QED-C), cuyo objetivo es acelerar la maduración

tecnológica y su conversión en aplicaciones de defensa (Parker *et al*., 2022). Cabe destacar que, a diferencia de China, Estados Unidos cuenta con un liderazgo del sector privado en lo que respecta a la implementación tecnológica. En cambio, en el país asiático, las empresas privadas desempeñan un papel limitado, con pocas compañías relevantes, como Quantum CTek y Origin Quantum (Parker, 2024).

En 2024, la industria cuántica mundial generó aproximadamente US$ 1,5 mil millones en ingresos procedentes de la computación cuántica y la tecnología de sensores, con un crecimiento previsto de alrededor del 25 % anual, impulsado por un ecosistema que ya emplea a más de 200 mil profesionales y cuenta con inversiones privadas de US$ 2,6 mil millones y públicas de US$ 44,5 mil millones (Sri International, 2024).

Al mismo tiempo, China ha consolidado su posición dominante en el ámbito de las comunicaciones cuánticas, destacando por su amplia red de distribución de claves cuánticas y el satélite Micius, y ha invertido más de US$ 15 mil millones en investigación pública en este campo. En materia de sensores, la competitividad del país se encuentra al mismo nivel que la de Estados Unidos, aunque aún se queda atrás en computación cuántica, un área en la que Estados Unidos mantiene una ventaja en cuanto a hardware y calidad de la investigación (Omaar; Makaryan, 2024).

La supremacía tecnológica se ha convertido en un imperativo estratégico para preservar la influencia global de Estados Unidos, especialmente ante la intensificación de la competencia con China. La articulación entre innovación y defensa nacional exige que el Estado estadounidense actúe de manera coordinada en la protección de las cadenas de suministro, la formación de capital humano y la aceleración de la conversión de la investigación básica en aplicaciones prácticas (Schmidt, 2023).

Brasil ha dado los primeros pasos en el fomento de estudios para el desarrollo de TQ con aplicaciones en el ámbito de la defensa a través de iniciativas en las que participan instituciones civiles y militares. Entre los principales hitos de esta trayectoria, se destacan el proyecto IATQ, el programa Pró-Defesa V, la Red Río Cuántica y el creciente protagonismo de instituciones como el IME, el ComDCiber y la ECEME.

El proyecto IATQ, financiado por Pró-Defesa V (CAPES/Ministerio de Defensa), tiene como objetivo desarrollar una red de investigación centrada en tecnologías disruptivas —definidas como aquellas capaces de provocar cambios significativos en los paradigmas tecnológicos existentes y generar nuevas capacidades estratégicas y operativas (Girardi; França Junior; Galdino, 2024). La IA y las TQ constituyen los ejes centrales de esta iniciativa. El proyecto se divide en cuatro dimensiones: Estudios estratégicos y Políticas Públicas aplicadas a la Defensa; Ciencia, Tecnología e Innovación aplicadas a la Defensa; Investigación, Desarrollo, Innovación y Evaluación; y Capacitación.

El IATQ coordina instituciones como el IME, el Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), la ECEME, la Universidad de la Fuerza Aérea (UNIFA), la Escuela Superior de Guerra (ESG) y la Escuela Superior de Defensa (ESD), así como la Universidad de São Paulo (USP), la Universidad Federal de Pernambuco (UFPE), la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), la Universidad Federal de Amazonas (UFAM), la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) y la Universidad de Brasilia (UnB).

Al mismo tiempo, la Red Río Cuántica representa uno de los principales experimentos de infraestructura cuántica de América Latina, al establecer un sistema de comunicación segura basado en QKD a través de fibra óptica. Coordinada por el profesor Antonio Zelaquett Khoury (IF/UFF), la red reúne a instituciones como la Universidad Federal Fluminense (UFF), el Centro

Brasileño de Investigaciones Físicas (CBPF), el IME y el ITA, además de contar con el apoyo estratégico del ComDCiber.

La Red Hermes Cuántica es un proyecto pionero del IME que tiene como objetivo establecer una red metropolitana de comunicación cuántica basada en QKD. La propuesta busca poner a prueba la viabilidad técnica de la criptografía cuántica en territorio nacional, pero también evaluar su aplicación en redes militares de comando y control y en comunicaciones críticas, ampliando así la resiliencia del sistema de defensa brasileño frente a las amenazas cibernéticas y las tecnologías emergentes (Brasil, 2024a).

El IME centra sus esfuerzos en la investigación y el desarrollo tecnológico, mientras que el ComDCiber y la ECEME se dedican a la coordinación entre los distintos actores y a la incorporación de las tecnologías a las necesidades estratégicas. Longo y Moreira (2013) señalan que el sector de defensa brasileño cuenta con un sistema de innovación aún en formación, en el que las instituciones militares tienden a ocupar el espacio que, en países más avanzados, está ocupado por una industria privada consolidada. En el ámbito cuántico, esto se hace aún más evidente, dada la etapa inicial en la que se encuentra el ecosistema nacional.

La carrera cuántica, que ya se ha intensificado entre las grandes potencias, exige a los Estados adoptar una postura proactiva en la formulación de políticas públicas, el fortalecimiento de los ecosistemas científicos y la integración entre las capacidades civiles y militares. En el caso de Brasil, las iniciativas, aún en fase inicial, apuntan hacia caminos prometedores, pero requieren coordinación institucional, inversiones continuas y una visión estratégica a largo plazo (Abelém, 2026). En este sentido, la profundización de la cooperación entre los sectores civil y militar se presenta como un aspecto fundamental para hacer posible la transferencia de conocimiento, acelerar la maduración tecnológica y garantizar que las aplicaciones cuánticas estén alineadas con los objetivos de defensa nacional. Es este el tema que aborda la siguiente sección, al examinar los fundamentos, los desafíos y las oportunidades de la cooperación civil-militar en el campo de las TQ.

3 LA COOPERACIÓN CIVIL-MILITAR COMO ESTRATEGIA DE INNOVACIÓN EN EL ÁMBITO DE LA DEFENSA

La defensa desempeña un papel importante en la seguridad y la soberanía de un país. Está formada por una compleja red de relaciones entre instituciones y empresas, tanto públicas como privadas. En este contexto, la interacción entre los sectores de cooperación civil y militar (CIMIC) —conocida como dualidad civil-militar— ha cobrado protagonismo en las directrices oficiales brasileñas, como la Política Nacional de Defensa (PND) y la Estrategia Nacional de Defensa (END). Estas directrices señalan que la cooperación entre ambos sectores es fundamental para el fortalecimiento de la Base Industrial de Defensa (BID), ampliando la autonomía tecnológica, la capacidad productiva nacional y la competitividad empresarial (Brasil, 2020).

La CIMIC puede entenderse como la interacción estructurada entre actores civiles (universidades, centros de investigación, empresas de base tecnológica) e instituciones militares (Fuerzas Armadas, institutos militares de investigación, centros de doctrina), con el objetivo de desarrollar capacidades conjuntas. En el sector de la defensa, esta cooperación viene impulsada tanto por la demanda de tecnologías de doble uso (civil y militar) como por la necesidad de optimizar los recursos y reducir la dependencia tecnológica externa (Hing, 2010).

Las instituciones militares brasileñas estructuran la cooperación civil-militar en el ámbito del desarrollo de la TQ mediante un conjunto coordinado de iniciativas institucionales, proyectos estratégicos y colaboraciones técnico-científicas que van más allá de los mecanismos formales de cooperación. Esta colaboración no se limita a la firma de acuerdos institucionales, sino que se materializa en el desarrollo de capacidades tecnológicas concretas, en la creación de redes de investigación y en el desarrollo de infraestructuras científicas orientadas a la soberanía tecnológica nacional. En este sentido, cabe destacar el papel protagonista del IME, que actúa como uno de los principales polos de integración entre el sector de la defensa y la comunidad científica civil, estableciendo colaboraciones con diversas instituciones, como la Universidad Federal de São Carlos (UFSCar), la USP, el Centro Integrado de Fabricación y Tecnología (CIMATEC), el Instituto Federal de Amazonas (IFAM), la UFPE y el Centro Nacional de Investigación en Energía y Materiales (CNPEM), además de universidades vinculadas a la Red Río Cuántica (Brasil, 2024a).

Esta cooperación se plasma en proyectos como la Red Río Cuántica (RRQ- Rede Rio Quântica) y la Red Hermes Cuántica (RHQ- Rede Hermes Quântica). Mientras que la RRQ representa un primer esfuerzo de coordinación institucional y experimental, la RHQ plantea retos tecnológicos más sofisticados orientados a la consolidación de una infraestructura de comunicaciones cuánticas con aplicaciones estratégicas. Estas iniciativas contribuyen a la organización del entorno científico-tecnológico nacional y al desarrollo de capacidades fundamentales para el avance futuro de estas tecnologías (Moreira; Carneiro; Galdino, 2025).

En este contexto, la creación del laboratorio de tecnologías cuánticas del Ejército Brasileño en el IME constituye un hito estratégico para el sector de la defensa y supone una importante inversión nacional en este ámbito. Este laboratorio permite llevar a cabo investigaciones en el ámbito de las comunicaciones y los sensores cuánticos, con el objetivo de dominar todo el ciclo de desarrollo de estas tecnologías, desde la investigación básica hasta las aplicaciones de interés militar. Proyectos como el desarrollo de emisores de fotones individuales, orientados, por ejemplo, a la futura implementación de la RHQ, ilustran cómo la cooperación entre el ámbito civil y el militar se traduce en avances tecnológicos concretos (Brasil, 2024a).

Además, la cooperación se articula a través de la producción científica y la difusión del conocimiento entre los sectores civil y militar. Los investigadores del IME han contribuido al debate estratégico sobre las tecnologías cuánticas, como se puede observar en publicaciones recientes que abordan el tema desde la perspectiva de la soberanía nacional, como las de Oliveira, Azevedo y Moreira (2025), Costa, Azevedo y Moreira (2025) y Carneiro (2024). Esta dimensión implica la elaboración de agendas de investigación, la definición de prioridades estratégicas y la consolidación de una comunidad epistémica orientada a la defensa.

En el plano territorial y estratégico, cabe destacar también la propuesta de ampliar estas redes a regiones sensibles, como la Amazonía, mediante la integración con la infraestructura del programa Amazonia Conectada. La construcción de una red metropolitana en Manaos, en colaboración con universidades locales y organismos de fomento, muestra que la cooperación civil-militar también se organiza en torno a objetivos geopolíticos y de integración nacional, ampliando el alcance de las tecnologías cuánticas más allá de los grandes centros de investigación (Brasil, 2024c).

A partir de estas experiencias, la cooperación civil-militar en el ámbito de las TQ en Brasil ya se perfila como una realidad en expansión, respaldada por proyectos concretos, inversiones estructurales y una creciente coordinación institucional. Se presenta como un proceso activo de desarrollo de

capacidades tecnológicas, en el que las instituciones militares desempeñan un papel importante en la coordinación, el fomento y la aplicación del conocimiento científico en beneficio de la defensa nacional.

La PND y la END ya han sufrido varias modificaciones. Aunque se trata de versiones diferentes del mismo documento, todas ellas subrayan la necesidad de una integración civil-militar. La dualidad del sector se refiere a la interdependencia funcional a lo largo de la investigación, el desarrollo, la producción y la aplicación de tecnologías de interés para la defensa. Esta relación permite compartir competencias técnicas, infraestructuras e innovación, lo que fomenta beneficios mutuos que redundan tanto en el aparato militar como en el sector productivo civil (Brasil, 2008).

La buena gestión de las actividades en el ámbito CIMIC requiere un entorno institucional propicio, con políticas públicas de fomento, financiación continua y una visión estratégica compartida. En el caso de las tecnologías cuánticas, cuya complejidad técnica y coste de desarrollo son elevados, la CIMIC se convierte en una estrategia no solo deseable, sino necesaria. Las instituciones militares brasileñas, como el Instituto de Estudios Avanzados (IEAv), el IME y el Centro Tecnológico del Ejército (CTEx), han contribuido a promover la CIMIC en el ámbito de las tecnologías emergentes. Estas instituciones actúan como vectores de integración entre la investigación académica civil y las necesidades estratégicas del sector de la defensa (Brasil, 2025c).

Existen modelos institucionales que se utilizan para facilitar la cooperación civil-militar en Brasil. Entre ellos destacan: 1) los acuerdos de cooperación técnica (ACT) entre universidades y comandos militares; 2) las redes temáticas de investigación, como las organizadas en el marco de la Estrategia Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (ENCTI); y 3) proyectos vinculados a la Armada de Brasil y a la Fuerza Aérea Brasileña, como el seminario sobre innovaciones disruptivas y el Núcleo de Excelencia en Ciencias y Tecnologías Cuánticas (Brasil, 2023c), centrado en la criptografía y las comunicaciones seguras.

Un ejemplo es el proyecto de desarrollo de sensores cuánticos para la detección de submarinos, en el que participan investigadores civiles e ingenieros militares y que se utilizará en sistemas tácticos integrados en drones y buques de la Armada, incluidos los submarinos, con tecnología totalmente nacional (Brasil, 2016).

Uno de los proyectos más importantes actualmente en el IME es la primera red de criptografía cuántica del país. La denominada Red Rio Cuántica (Rede Rio Quântica) es capaz de transmitir bits cuánticos a través de fibra óptica y láser al aire libre. Un haz de láser verde, visible sobre la bahía de Guanabara, conecta el Instituto de Física de la UFF, en Niterói, con el CBPF, en Urca, como parte de la Red Río Cuántica, la primera red experimental brasileña de comunicación basada en la mecánica cuántica. Además de esta conexión aérea, la red integra otras instituciones, como la UFRJ, la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (PUC-Rio) y el IME, a través de fibra óptica. El proyecto, que se encuentra en fase de pruebas desde 2021, tiene como objetivo garantizar la seguridad en la transmisión de datos mediante la criptografía cuántica (Lopes, 2024).

Otra iniciativa destacada de colaboración entre los sectores civil y militar en el ámbito de la innovación en materia de defensa fue el Seminario sobre Tecnologías de Interés para la Defensa, organizado por la Secretaría de Productos de Defensa (SEPROD) del Ministerio de Defensa, los días 12 y 13 de mayo de 2021. El evento reunió a representantes de las Fuerzas Armadas, el mundo académico, la industria y los centros de investigación para debatir los avances en computación y comunicación cuánticas. Durante la inauguración, el entonces comandante de la Armada, el almirante de escuadra Almir Garnier dos Santos, destacó la importancia histórica de las innovaciones

tecnológicas en la transformación de las capacidades operativas de las Fuerzas Armadas, y subrayó el papel central de la ciencia en la estrategia de defensa (Brasil, 2025c).

En dicho evento, el entonces director del IEAv, el coronel de aviación Fabio Almeida, presentó el estudio titulado Sistema de comunicación seguro para el Sector Aeroespacial, centrado en el análisis de las tecnologías de comunicación cuántica que ya se han probado o que están en funcionamiento en plataformas orbitales y aeronaves. La investigación reveló que habían tenido éxito al menos diez experimentos internacionales en los que se había utilizado el intercambio de partículas atómicas para establecer comunicaciones seguras entre vehículos tripulados, satélites y estaciones terrestres. Esta iniciativa refuerza la capacidad institucional de las Fuerzas Armadas para seguir de cerca, analizar e incorporar tecnologías de vanguardia, lo que contribuye directamente a la seguridad de las comunicaciones militares y abre la puerta a colaboraciones con instituciones civiles en el desarrollo de aplicaciones cuánticas adaptadas al contexto nacional (Brasil, 2025a).

Además de estas iniciativas, el Comando de Defensa Cibernética (ComDCiber) ha desempeñado un papel relevante en la coordinación del ecosistema nacional de tecnologías cuánticas, especialmente mediante la organización del Encuentro Nacional de Tecnologías Cuánticas para la Defensa. El evento reúne a representantes de las Fuerzas Armadas, del mundo académico, de la industria y de organismos gubernamentales, con el objetivo de identificar competencias, debatir aplicaciones estratégicas y fomentar la cooperación civil-militar. En este contexto, el ComDCiber actúa como agente coordinador, fomentando la integración entre los distintos actores y orientando el debate hacia temas fundamentales, como la ciberseguridad en el ámbito cuántico y el desarrollo de comunicaciones seguras (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2023).

A pesar de los avances, la CIMIC se enfrenta a importantes retos, entre los que se encuentran: i) la falta de continuidad política y presupuestaria: los cambios de gobierno suelen implicar reorientaciones en las políticas de ciencia y tecnología, lo que afecta a la estabilidad de los proyectos conjuntos; ii) barreras culturales e institucionales: las diferentes culturas organizativas de las instituciones civiles y militares dificultan, en ocasiones, la comunicación y la gestión compartida de los proyectos; y iii) la escasez de personal especializado en tecnologías cuánticas, tanto en el ámbito civil como en el militar, lo que exige políticas de formación y retención de talento (Rusinelli; Souza; Miano, 2024).

La política de defensa brasileña se caracteriza por la discontinuidad entre los distintos ciclos de gobierno, lo que pone en peligro proyectos de largo plazo como los cuánticos (Silva; Souza, 2021). A falta de mecanismos permanentes de financiación y coordinación, la cooperación civil-militar tiende a depender de iniciativas puntuales, lo que debilita la acumulación de capacidades a lo largo del tiempo.

Una vez superados estos retos, la cooperación entre el ámbito civil y el militar ofrece la posibilidad de construir una base tecnológica sólida, autóctona y competitiva en el sector de la defensa. La sinergia entre los conocimientos técnico-científicos civiles y la capacidad organizativa y logística de las Fuerzas Armadas permite acelerar el desarrollo de tecnologías críticas, como los sensores cuánticos, los sistemas de criptografía cuántica y las redes de comunicación ultraseguras (Moura, 2024).

Desde una perspectiva comparativa, los modelos de Estados Unidos y China se sustentan en la continuidad de las inversiones y en una coordinación estratégica a largo plazo (Parker *et al*., 2022; Julienne, 2024). Sin embargo, Brasil aún no cuenta con esas condiciones. La cooperación civil-militar

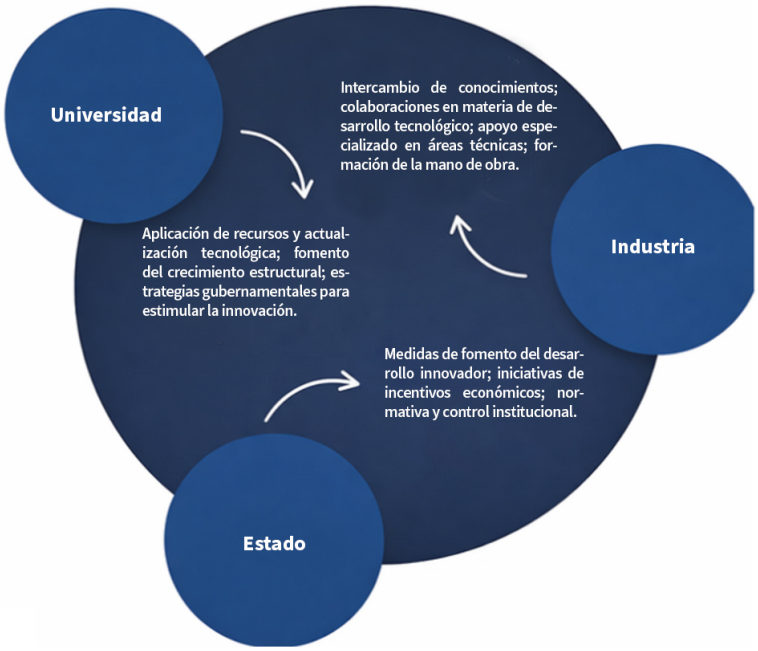
representa, en este contexto, la principal vía disponible para avanzar en el ámbito cuántico, compensando la ausencia de un ecosistema privado sólido y de una política nacional integrada para el sector.

El fortalecimiento de la relación entre los ámbitos civil y militar para el desarrollo de la investigación y el avance tecnológico en el campo de las tecnologías cuánticas requiere esfuerzos coordinados. Esta colaboración exige políticas públicas que fomenten la cooperación entre universidades, centros de investigación, empresas e instituciones de defensa, así como inversiones continuas en infraestructuras, formación de personal y transferencia de conocimientos. La integración entre estos sectores es esencial para consolidar un entorno de innovación sólido, capaz de transformar los descubrimientos científicos en aplicaciones estratégicas que impulsen el avance de las tecnologías cuánticas en Brasil.

4 CONSIDERACIONES SOBRE LA COOPERACIÓN CIVIL-MILITAR EN TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

El desarrollo de nuevas tecnologías disruptivas y las adaptaciones necesarias en la doctrina brasileña requieren una coordinación entre los distintos organismos e instituciones que conforman la sociedad para que todo funcione correctamente. La Teoría de la Triple Hélice analiza el funcionamiento de la asociación entre la universidad, el gobierno y el sector productivo. La aplicación de esta teoría al análisis del funcionamiento de la tecnología disruptiva se considera una posibilidad, ya que este enfoque entiende que la innovación, en su forma más pura, ya no es un resultado exclusivo de una sola esfera institucional (Etzkowitz, 2017). Esta teoría sostiene que, para aplicar eficazmente una innovación, es necesaria una interacción colaborativa entre la universidad, la industria y el Estado, con diversos objetivos alineados entre las partes, tal y como se destaca en la Figura 1.

Figura 1 –Triple Hélice



Fuente: Elaborado por los autores basado en Etzkowitz (2017).

En lo que respecta al sector industrial, las *startups*, las *deep tech* y las empresas consolidadas pueden buscar colaboraciones con laboratorios universitarios con el fin de acelerar la innovación e internalizar capacidades cuánticas. Estas colaboraciones son fundamentales para acortar el ciclo entre la investigación básica y la aplicación comercial, lo que permite que los conocimientos generados en el ámbito académico se pongan a prueba, se adapten y se transformen rápidamente en productos o servicios de alto valor añadido. Además, la interacción con el entorno universitario permite acceder a talentos altamente cualificados, compartir el uso de infraestructuras científicas de vanguardia y participar en proyectos cooperativos de I+D. Este enfoque estratégico también favorece la creación de ecosistemas de innovación centrados en el ámbito cuántico, en los que el intercambio continuo entre la investigación, la aplicación y el mercado se convierte en una ventaja competitiva para el país (Costa; Souza; Castro, 2020).

La aplicación práctica del modelo de la Triple Hélice en el contexto de las tecnologías cuánticas aplicadas a la defensa se manifiesta en la colaboración concreta entre universidades, instituciones militares y el sector productivo para hacer posible todo el proceso, desde la investigación básica hasta la implementación de soluciones estratégicas. En el caso de Brasil, esta dinámica puede observarse en la labor del IME, que, en colaboración con universidades como la UFSCar, la USP y la UFPE, y centros de investigación como el CNPEM, desarrolla proyectos en el ámbito de las comunicaciones y la detección cuántica adaptados a las necesidades de la defensa nacional. Estas iniciativas suelen contar con el apoyo de programas gubernamentales de fomento, como el Pró-Defensa, lo que pone de manifiesto el papel del Estado como financiador y coordinador (Brasil, 2024a).

Además, proyectos como la Red Hermes Cuántica y los esfuerzos para implantar infraestructuras en la región amazónica demuestran cómo esta cooperación se traduce en aplicaciones reales, que implican la transferencia de conocimientos, el desarrollo tecnológico y las pruebas en entornos operativos. De este modo, la Triple Hélice deja de ser un mero modelo teórico y se materializa como un marco institucional capaz de integrar competencias científicas, capacidades operativas e intereses estratégicos, promoviendo la innovación en ámbitos sensibles y contribuyendo a la soberanía tecnológica nacional.

En este contexto, la Triple Hélice ofrece un modelo adecuado para comprender y orientar la dinámica de la innovación en tecnologías cuánticas. En consecuencia, la creación de consorcios interinstitucionales, redes de investigación aplicada y entornos de innovación compartidos son expresiones concretas de esta articulación, cuya sinergia es indispensable para que el país alcance un papel protagonista en la denominada segunda revolución cuántica.

Según la lógica de la Triple Hélice, el papel de la universidad es fundamental y polifacético, especialmente en el contexto de las tecnologías cuánticas. Más allá de ser una mera generadora de conocimiento, esta institución pública actúa como agente activo de innovación, fomentando interacciones estratégicas con el sector productivo y el gobierno con el fin de impulsar el desarrollo científico y tecnológico del país. Es responsable de la generación de conocimientos fundamentales en áreas como la mecánica cuántica, la ciencia de los materiales y la teoría de la información, lo que constituye la base científica sobre la que se construyen las innovaciones tecnológicas. Además, contribuye a la formación de personal altamente cualificado, preparando a investigadores, ingenieros y técnicos capaces de desarrollar su actividad tanto en el ámbito académico como en el industrial, y de mantener un ecosistema de innovación sólido y competitivo (Sabato; Botana, 1975).

El creciente acercamiento entre la universidad y el sector productivo ha dado lugar a investigaciones aplicadas, al desarrollo de prototipos, a la transferencia de tecnología, a la generación de patentes

y a la creación de startups de base científica, especialmente en el ámbito de la informática y la comunicación cuántica. La institución pública también contribuye directamente al Estado, participando en la elaboración de políticas públicas, prestando asesoramiento técnico a los organismos gubernamentales y liderando programas estratégicos, como centros de excelencia y redes interinstitucionales.

Estas instituciones contribuyen a la internacionalización de la ciencia mediante el establecimiento de colaboraciones a nivel mundial y la participación en redes multilaterales de investigación, lo que garantiza que el país esté conectado con las fronteras más avanzadas del conocimiento. De este modo, la universidad ocupa una posición estratégica en la tríada de la innovación, siendo indispensable para el fortalecimiento de la soberanía científica y tecnológica nacional (Rothwell, 1994).

El sector productivo desempeña un papel importante en la dinámica de la Triple Hélice —especialmente en el avance de las tecnologías cuánticas— al transformar el conocimiento generado por la universidad en soluciones aplicables, escalables y económicamente viables. Las empresas consolidadas, las *startups*, las *deep techs* y las industrias de alta tecnología actúan como puentes entre la investigación y el mercado, invirtiendo en desarrollo experimental, validación técnica, diseño de prototipos, fabricación avanzada y comercialización.

Además, el sector productivo contribuye con inversiones financieras directas en I+D, ya sea a través de centros internos de innovación, colaboraciones con universidades o la participación en programas públicos de incentivos. Este sector también desempeña un papel importante en la creación de empleo cualificado y en la formación práctica de profesionales, tanto a través de prácticas y pasantías tecnológicas como de programas de formación técnica (Schreiber, 2013).

En el ámbito de las tecnologías cuánticas, la industria es fundamental para ampliar la escala de los prototipos desarrollados en el ámbito académico, para probarlos en entornos reales y para llevar a cabo los pasos necesarios para su introducción en el mercado, como la certificación, la estandarización y la industrialización. Las empresas del sector productivo también pueden desempeñar un papel de liderazgo en proyectos cooperativos de innovación, organizando consorcios empresariales o integrándose en redes con universidades e institutos públicos de investigación, como es el caso del IME. Al incorporar tecnologías emergentes e internalizar competencias científicas y tecnológicas, el sector productivo impulsa la competitividad nacional y la autonomía tecnológica, actuando como un vector estratégico para el éxito de la segunda revolución cuántica (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2025).

Teniendo en cuenta el modelo de la Triple Hélice, el Gobierno desempeña un papel estratégico y de articulación en el proceso de innovación, especialmente en el desarrollo de tecnologías emergentes. Su labor es fundamental para crear las condiciones institucionales, económicas y normativas que permitan una cooperación eficaz entre las universidades y el sector productivo (Etzkowitz, 2017). El gobierno actúa, en primer lugar, como responsable de la formulación de políticas públicas y estrategias nacionales capaces de orientar el desarrollo científico-tecnológico a largo plazo. La creación de programas como los planes nacionales de informática y comunicación cuántica es un claro ejemplo de ello, ya que contribuye a reducir las incertidumbres tecnológicas, orientar las inversiones y establecer prioridades estratégicas para el país (Dorff; Meyer, 2006).

Además, el Estado se encarga de financiar el riesgo, apoyando proyectos de investigación y desarrollo a través de organismos de fomento, subvenciones, créditos especiales, becas e incentivos fiscales. Este apoyo es especialmente importante en ámbitos innovadores como la física cuántica, en los que los costes son elevados, los beneficios inciertos y la inversión privada limitada (Rodrigues; Libero, 2024).

Otra función importante es la de regulador y facilitador, que implica la creación de marcos legales y entornos normativos que favorezcan la innovación, la protección de la propiedad intelectual, la transferencia de tecnología y la seguridad jurídica de las colaboraciones público-privadas.

El Gobierno también puede actuar como demandante cualificado, especialmente a través de la contratación pública destinada a la innovación en sectores como la defensa, la salud, las telecomunicaciones y la ciberseguridad, lo que contribuye a la validación y la escalabilidad de las nuevas tecnologías. Estas inversiones resultan evidentes en iniciativas como el plan del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MCTI) en materia de tecnologías cuánticas para crear un Laboratorio de Tecnologías Cuánticas en el Centro Brasileño de Investigaciones Físicas (CBPF). El objetivo del proyecto es crear un espacio para desarrollar la tecnología de fabricación, caracterización y puesta en funcionamiento de bits cuánticos y otros dispositivos superconductores (Brasil, 2025b).

Ejemplos como este ponen de manifiesto el papel del Gobierno en la formación de capital humano al apoyar programas educativos, fomentar estudios de posgrado interdisciplinares, promover los intercambios internacionales y garantizar el acceso a infraestructuras científicas de vanguardia. Por ello, su colaboración integrada con universidades y empresas es indispensable para posicionar al país de forma soberana y competitiva en la carrera mundial por el liderazgo en el ámbito de las tecnologías cuánticas. En este contexto, se parte de la base de que la articulación de este triple eje no solo debe fomentarse, sino que debe estructurarse de forma estratégica y continua, con el fin de consolidar un ecosistema nacional de innovación en tecnologías cuánticas (Brasil, 2023b)

La creación de políticas públicas que fomenten la inversión en investigación de vanguardia, así como la oferta de mecanismos de financiación específicos para startups de tecnología cuántica, es una medida fundamental para transformar el conocimiento científico en aplicaciones económicamente viables proporcionadas por el gobierno. Además, la presencia activa del Estado como regulador, financiador y, en muchos casos, como principal demandante —especialmente en los ámbitos de la defensa, las telecomunicaciones y la seguridad de la información—, puede reducir la incertidumbre tecnológica y atraer capital privado hacia proyectos de alto riesgo (Brasil, 2024b).

La formación del personal, por su parte, debe considerarse una prioridad nacional, mediante programas de posgrado interdisciplinares, intercambios internacionales y el fomento de iniciativas educativas orientadas a la formación en ciencia e ingeniería cuántica.

La consolidación de una base científica sólida, unida a la capacidad de aplicación tecnológica y al respaldo institucional del Estado, es lo que permitirá a Brasil no solo seguir el ritmo, sino también influir en el rumbo de la innovación cuántica a escala mundial. Por lo tanto, la Triple Hélice no es solo una teoría explicativa, sino una guía práctica para la formulación de estrategias de desarrollo tecnológico que integren competencias y refuercen la soberanía científica y económica del país.

Las tecnologías cuánticas se derivan principalmente de la denominada segunda revolución cuántica, caracterizada por el control y la manipulación precisa de sistemas cuánticos individuales, como átomos, iones, fotones y cuasipartículas. A diferencia de la primera revolución, que dio lugar a tecnologías hoy en día muy extendidas (como los semiconductores, los láseres y la energía nuclear), la nueva revolución supone avances disruptivos. En otras palabras, se trata de cambios tecnológicos que provocan cambios radicales en las capacidades existentes, alterando los patrones operativos, estratégicos y tecnológicos al introducir nuevos paradigmas que sustituyen o superan a las tecnologías anteriores, especialmente en ámbitos considerados críticos para la defensa (Girardi; França Junior;

Galdino, 2024). Estas modificaciones afectan directamente a la detección, la comunicación segura, la navegación y la computación de alto rendimiento (LevelQuantum, 2023).

Aunque se encuentran en las primeras fases de los niveles de Madurez Tecnológica (TRL), estas tecnologías gozan de un amplio reconocimiento como tecnologías de doble uso: las aplicaciones civiles y militares se solapan considerablemente, lo que genera una necesidad urgente de estrategias de cooperación entre ambos sectores (LevelQuantum, 2023).

La colaboración entre civiles y militares para el desarrollo de nuevas tecnologías disruptivas puede reducir el acceso privilegiado en el ámbito internacional. El IME cuenta con un dispositivo emisor de fotones únicos a partir de la comunicación cuántica, cuyo objetivo es sentar las bases para sistemas de comunicación cuántica ultraseguros, reforzando así la BID y reduciendo la dependencia exterior. La colaboración entre el sector civil y el militar se enmarca en una cooperación entre el IME, la UFSCar y el CNPEM, con el apoyo de la UFSCar (nanoestructuras) y del Laboratorio Nacional de Luz Sincrotrón (Brasil, 2024a).

El desarrollo del emisor de fotones únicos por parte del IME está directamente relacionado con las iniciativas nacionales en materia de comunicación cuántica, como la RRQ. Este tipo de dispositivo constituye uno de los componentes fundamentales para la implementación de protocolos de QKD, ya que permite la generación controlada de estados cuánticos de luz. En este sentido, aunque se encuentren en fase experimental, estos avances contribuyen a la validación y la mejora de las infraestructuras de comunicación segura basadas en los principios de la mecánica cuántica en Brasil (Brasil, 2024a).

Las instituciones participantes llevaron a cabo proyectos como el emisor de fotones, que fue uno de los primeros programas del IME centrados en las tecnologías cuánticas; su objetivo era desarrollar una prueba de concepto de una red metropolitana basada en las comunicaciones cuánticas. La colaboración civil-militar en el proyecto es esencial, ya que integra los conocimientos técnicos de las universidades y los centros de investigación con las necesidades operativas de las Fuerzas Armadas, siguiendo modelos adoptados a nivel internacional, como el programa de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN, 2022), que impulsa soluciones cuánticas *dual-use* en colaboración con *startups*. En el contexto nacional, la puesta en marcha de los planes de desarrollo del MCTI y de los investigadores civiles demuestra que esta sinergia acelera tanto el desarrollo como la validación tecnológica en entornos reales de defensa (Carneiro, 2024).

Además, el IME cuenta con el Programa Quantum, cuyo objetivo es la creación e implementación del Centro de Desarrollo de Tecnologías Cuánticas del Ejército Brasileño; el proyecto Proinvestigación del Departamento de Operaciones de Comercio Exterior (DECEx), titulado "Estudo do impacto da Inteligência Artificial e das Tecnologias Quânticas no Preparo e Emprego da Força Terrestre" (Estudio del impacto de la inteligencia artificial y las tecnologías cuánticas en la preparación y el empleo de la Fuerza Terrestre); y el Programa Pró-Defensa (CAPES), titulado "Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas: construindo e integrando agendas e redes de pesquisa em tecnologias disruptivas para aprimorar e ampliar a Segurança e a Defesa Nacional" (Inteligencia Artificial y Tecnologías Cuánticas: construcción e integración de agendas y redes de investigación en tecnologías disruptivas para mejorar y ampliar la Seguridad y la Defensa Nacional), en colaboración con otras 42 instituciones (Rodrigues; Libero, 2024).

Otras instituciones, como la ECEME, también realizan diversas actividades que abarcan el ámbito civil-militar con el fin de fomentar el pensamiento crítico en el ámbito de las tecnologías cuánticas. El programa de posgrado *stricto sensu* incluye máster académico, doctorado y posdoctorado, con líneas de investigación centradas en estudios estratégicos y de defensa. Mientras que

el IME se ocupa de los aspectos técnicos de la tecnología cuántica, la ECEME aborda el "por qué, cuándo y dónde emplear" estas tecnologías, lo cual es fundamental para orientar las inversiones, la doctrina y las colaboraciones. La formación de pensadores estratégicos con conocimientos tecnológicos es uno de los objetivos de la institución (Rodrigues; Libero, 2024).

La integración de las instituciones militares permite armonizar, junto con las instituciones civiles, los intereses estratégicos de la defensa nacional con las capacidades científicas del país, lo que favorece el desarrollo de soluciones tecnológicas de doble uso. El uso compartido de la infraestructura de laboratorio, el intercambio de conocimientos técnico-científicos y la formación de personal especializado garantizan una mayor eficiencia en la puesta en marcha de proyectos delicados, como las redes de comunicación cuántica. Al institucionalizar esta colaboración, Brasil avanza hacia la consecución de la autonomía tecnológica, se prepara para futuros escenarios de amenazas cibernéticas y consolida su soberanía digital en ámbitos críticos para la seguridad (LevelQuantum, 2023).

La ECEME ha incorporado el Ciclo de Estudios Estratégicos (CEE) como una iniciativa fundamental para profundizar en el pensamiento militar orientado a las transformaciones tecnológicas actuales (Brasil, 2025e). En la serie de cursos y seminarios del CEE, temas como la computación cuántica, los sensores cuánticos y las comunicaciones seguras se abordan no solo como cuestiones de interés científico, sino como elementos fundamentales para la modernización de la doctrina militar brasileña. El evento se articula en torno a encuentros temáticos, en los que participan oficiales en formación, investigadores civiles, académicos y representantes de instituciones estratégicas, como el Ministerio de Defensa, el MCTI, el IME y el Centro de Gestión y Operaciones del Sistema de Protección de la Amazonia (Cenispam) (Brasil, 2025b).

Este enfoque multidisciplinar permite un análisis integrado de las tendencias tecnológicas y su impacto en las capacidades operativas de las Fuerzas Armadas. Los estudios se centran en el medio y largo plazo, teniendo en cuenta las tecnologías emergentes en el contexto de la guerra híbrida (Fernandes, 2016), la transformación digital de la defensa y la necesidad de soberanía nacional en ámbitos sensibles. Además, el CEE puede contribuir directamente a la formación de líderes militares capaces de comprender y aplicar los conceptos derivados de la ciencia y la tecnología de vanguardia, articulándolos con las necesidades estratégicas del país. De este modo, la ECEME refuerza su papel como centro de excelencia en el pensamiento estratégico nacional, promoviendo una doctrina moderna, adaptada a los retos del siglo XXI (Brasil, 2023a).

5 CONCLUSIÓN

La investigación indica que las tecnologías cuánticas son un factor fundamental para la soberanía nacional y la proyección de poder en el siglo XXI. El análisis ha revelado que las instituciones militares brasileñas cumplen un papel importante como catalizadoras de la cooperación civil-militar, actuando simultáneamente como demandantes, coordinadoras y desarrolladoras de capacidades tecnológicas cuánticas.

El estudio señaló que el IME es un centro de excelencia técnica que desarrolla proyectos pioneros, como el emisor de fotones únicos y la Red Hermes Cuántica, además de establecer colaboraciones estratégicas con universidades civiles y centros de investigación. Al mismo tiempo, la ECEME se consolida como centro de reflexión estratégica, integrando las implicaciones de las tecnologías cuánticas en la doctrina militar brasileña a través de programas de formación y ciclos de estudios especializados.

La aplicación del modelo de la Triple Hélice ayuda a comprender la dinámica de la innovación en tecnologías cuánticas en Brasil. La sinergia entre las universidades (generación de conocimiento fundamental), el sector productivo (aplicación y escalabilidad) y el Gobierno (políticas públicas y financiación) ha demostrado ser necesaria para acelerar el desarrollo de las capacidades nacionales en un contexto de intensa competencia tecnológica internacional.

En el panorama geopolítico, la comparación entre las estrategias de Estados Unidos y China mostró modelos distintos, pero convergentes en sus objetivos relacionados con el desarrollo de tecnologías cuánticas. Mientras que Estados Unidos apuesta por un ecosistema diversificado de innovación público-privada, China adopta un enfoque centralizado con inversiones estatales masivas. Ambas estrategias reconocen que el dominio cuántico trasciende el avance científico y constituye un componente decisivo de la arquitectura internacional contemporánea.

En el caso de Brasil, los resultados indican que las iniciativas aún incipientes en el ámbito de las tecnologías cuánticas, aunque prometedoras, requieren una mayor coordinación institucional, una inversión continuada y una visión estratégica a largo plazo. El proyecto IATQ, la Red Río Cuántica, las iniciativas del ComDCiber (Centro Brasileño de Investigaciones Físicas, 2023) y la Red Hermes constituyen hitos importantes, pero su consolidación depende del fortalecimiento de la cooperación entre el sector civil y el militar mediante políticas públicas estructurales.

El estudio identificó retos que requieren una atención prioritaria: 1) la necesidad de continuidad política y presupuestaria para los proyectos a largo plazo; 2) la superación de las barreras culturales e institucionales entre los sectores civil y militar; y 3) el desarrollo de una infraestructura científica adecuada a las nuevas demandas tecnológicas.

Como recomendaciones, se sugiere: la institucionalización de mecanismos permanentes de diálogo entre civiles y militares; la creación de centros de excelencia multidisciplinares en tecnologías cuánticas; el establecimiento de programas de formación especializada en colaboración con universidades; la aplicación de políticas de contratación pública orientadas a la innovación que favorezcan el desarrollo de la Base Industrial de Defensa (BID) nacional; y la elaboración de una estrategia nacional integral en materia de tecnologías cuánticas que integre la defensa, la economía y la ciencia.

La cooperación civil-militar contribuye a la construcción de la soberanía tecnológica brasileña. La capacidad de articular los conocimientos científicos civiles con las capacidades organizativas militares determinará la posición de Brasil en la jerarquía mundial del poder en la era cuántica. De este modo, las instituciones militares brasileñas, al actuar como vectores de integración e innovación, se consolidan en el desarrollo de un entorno nacional de defensa tecnológicamente autónomo y competitivo.

La carrera cuántica, que ya está en marcha, exige al Estado brasileño una postura proactiva, coordinada y visionaria, capaz de transformar el potencial científico nacional en capacidades estratégicas efectivas. El éxito de este proceso dependerá de la consolidación de la cooperación civil-militar como política de Estado, garantizando que el país influya activamente en el rumbo de la revolución cuántica global.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (CAPES) y al Ministerio de Defensa (a través del Programa PRÓ-DEFESA V - Red IATQ, expediente

88887.961681/2024-00), así como a la *Financiadora de Estudos e Projetos* (FINEP) (a través de los proyectos PDI-DQBRN/1545-22, CMLabIME/0160-22 y QUANTUM II/3310-24) por la financiación recibida.

REFERENCIAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

COSTA, G.; AZEVEDO, C.; MOREIRA, F. Tecnologia quântica e defesa nacional: oportunidades e desafios para o Brasil. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, v. 23, n. 67, p. 275-299, 2025.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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