



A emergência tecnológica da comunicação quântica: uma análise patentométrica

Mabel Diz Marques Mota¹;
Valéria Loureiro da Silva²;
David Franco Regalado³;
Raphael de Oliveira Silva⁴;
Alexandre de Santa Bárbara Silva⁵;
João Carlos Pereira Passos⁶

Resumo: Este estudo examina a emergência tecnológica da comunicação quântica e sua estrutura colaborativa por meio de patentometria e análise de redes. Foram analisadas 195 famílias de patentes do Derwent Innovation Index (1998-2025) para mapear trajetórias tecnológicas, distribuição geográfica, principais depositantes e padrões de cooperação. Os resultados mostram aceleração inventiva após 2019, mas ainda em estágio inicial. A China lidera em número de depósitos, com estratégia de patenteamento predominantemente interna, voltada à consolidação de capacidades domésticas, enquanto Estados Unidos e Europa apresentam maior internacionalização. Universidades e institutos de pesquisa sustentam o núcleo inventivo, com empresas como QuantumCTek, Guangdong National Quantum Technology, Ruban Quantum Technology e Huawei ampliando aplicações em energia, telecomunicações, defesa e finanças. As tecnologias mais conectadas concentram-se em criptografia quântica e distribuição de chaves (QKD), articuladas com sistemas fotônicos. Ao integrar patentometria e análise de redes, o estudo oferece uma visão sobre a dinâmica institucional e tecnológica da comunicação quântica.

Palavras-chave: comunicação quântica; inovação tecnológica; patentes; redes de cooperação; segurança da informação.

Código JEL: O31; O33; D85.

Área Temática: 5.4 Mudanças técnicas, organizações e instituições

¹ SENAI CIMATEC. E-mail: mabeldizmarques@gmail.com | mabel.mota@fieb.org.br

² SENAI CIMATEC. E-mail: valeria.dasilva@fieb.org.br

³ SENAI CIMATEC. E-mail: david.regalado@fbter.org.br

⁴ SENAI CIMATEC. E-mail: raphael.silva@fbter.org.br | raphael.o.s@outlook.com

⁵ SENAI CIMATEC. E-mail: alexandre.barbara@fbter.org.br

⁶ SENAI CIMATEC. E-mail: joao.passos@fbter.org.br

The Technological Emergence of Quantum Communication: A Patentometric Analysis

Abstract: This paper examines the technological emergence of quantum communication and its collaborative structure through patentometric and network analysis. A dataset of 195 patent families from the Derwent Innovation Index (1998–2025) was analyzed to map technological trajectories, geographical distribution, leading assignees, and cooperation patterns. Results indicate accelerated inventive activity after 2019, though the overall volume remains limited, confirming early-stage technology. China leads patenting with a predominantly domestic strategy aimed at consolidating national capacities, while the United States and Europe show higher internationalization and foreign assignee participation. Universities and research institutes form the inventive core, with companies such as QuantumCTek, Guangdong National Quantum Technology, Ruban Quantum Technology, and Huawei expanding applications in energy, telecommunications, defense, and finance. The most connected technologies are quantum cryptography and key distribution (QKD), integrated with photonic systems. The study highlights the convergence between digital security and optical transmission, contributing to the understanding of institutional and technological dynamics in quantum communication.

Keywords: quantum communication; technological innovation; patents; cooperation networks; information security.

1. Introdução

A segurança da informação tem passado por transformações profundas devido ao avanço da computação quântica, o que coloca em risco os sistemas criptográficos clássicos atualmente em uso (Gisin et al., 2002; Pirandola et al., 2020). Nesse cenário, as tecnologias de comunicação quântica deixaram de ser um tema de pesquisa estritamente científico, passando a integrar agendas de inovação e segurança digital (Scarani et al., 2009; Chen; Tsai, 2025). Embora o campo apresente uma rápida expansão, permanece limitada a compreensão sistemática sobre como essas tecnologias se desenvolvem sob a perspectiva da dinâmica da atividade inventiva.

A comunicação quântica utiliza propriedades da mecânica quântica, como superposição e emaranhamento de fótons, para transmitir informações de forma ultra segura, sendo teoricamente segura contra interceptação, sob princípios da mecânica quântica. Suas aplicações têm se concentrado na implementação de protocolos de Distribuição Quântica de Chaves (QKD), fundamentais para garantir o sigilo incondicional na transmissão de dados sensíveis (Bennett; Brassard, 2014; Lo et al., 2014). Essas soluções encontram aplicabilidade crescente na proteção de redes de energia inteligentes (*smart grids*), em transações bancárias de alta segurança e em enlaces de comunicação por satélite para fins militares (Kong, 2020). Além disso, a integração da comunicação quântica com a Internet das Coisas (IoT) e com arquiteturas de computação em nuvem tem impulsionado o desenvolvimento de novos arranjos fotônicos e repetidores quânticos, visando ampliar o alcance e a viabilidade comercial dessas redes.

Nesse contexto de expansão das aplicações, torna-se essencial compreender como o avanço inventivo e institucional sustenta esse desenvolvimento. Para além dos progressos técnicos, é preciso observar os mecanismos de apropriação e cooperação que moldam o campo, já que a consolidação de tecnologias críticas depende da forma como o conhecimento é codificado em ativos de propriedade intelectual e articulado em redes de colaboração. Assim, este estudo busca descrever a evolução patentária, bem como relacionar os padrões observados às propriedades estruturais dos regimes tecnológicos, como cumulatividade, intensidade científica e apropriabilidade, que condicionam a emergência e a difusão de tecnologias.

Do ponto de vista teórico, a literatura de economia da inovação estabelece que as patentes são *proxies* relevantes para observar o reposicionamento competitivo de países e a emergência de novas rotas técnicas. Conforme destacado por Griliches (1990), os dados de patentes permitem mapear a evolução do conhecimento codificado. Adicionalmente, a análise de redes de colaboração entre empresas e universidades é essencial para compreender a difusão do conhecimento inventivo (Powell; Grodal, 2005; Coccia; Roshani; Mosleh., 2024). No caso da comunicação quântica, a hipótese central deste artigo deriva da lógica dos regimes tecnológicos: espera-se que a alta intensidade científica e a apropriabilidade típica de tecnologias críticas resultem em crescimento recente da atividade inventiva, concentração geográfica em poucos polos e baixa densidade colaborativa.

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo mapear e caracterizar a evolução da dinâmica inventiva das tecnologias de comunicação quântica e seus padrões de cooperação ao longo dos anos 1998 a 2025, combinando a metodologia de patentometria e análise de redes. Ao integrar essas abordagens, o estudo oferece uma visão sobre a dinâmica institucional e tecnológica da comunicação quântica no período recente. As interpretações geopolíticas, como soberania digital ou fragmentação tecnológica, serão tratadas de forma exploratória e com cautela, reconhecendo os limites da evidência empírica disponível. Em termos analíticos, busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: quais são as principais tendências tecnológicas, padrões de distribuição geográfica e estruturas de cooperação institucional que caracterizam o desenvolvimento inventivo recente da comunicação quântica?

A estrutura deste trabalho compreende quatro seções, além desta introdução. A Seção 2 apresenta o marco teórico, baseado na economia da inovação e nos regimes tecnológicos, que fundamenta a análise das trajetórias tecnológicas e dos padrões de cooperação. A Seção 3 descreve a metodologia, incluindo a extração de 195 famílias de patentes do Derwent Innovations Index (DII) e a aplicação de métricas de Análise de Redes Sociais. A Seção 4 discute os resultados, abordando a evolução do patenteamento, a distribuição geográfica, as redes de co-titularidade e a convergência tecnológica. Por fim, as considerações finais sintetizam as conclusões e implicações do estudo.

2. Economia da inovação e regimes tecnológicos

A economia da inovação compreende o conhecimento como um ativo cumulativo, incerto e parcialmente apropriável, o que torna os processos inovativos dependentes de trajetórias tecnológicas, estruturas institucionais e capacidades científicas acumuladas. Desde a tradição schumpeteriana, a inovação é entendida como elemento central da dinâmica econômica, na medida em que novas combinações tecnológicas reconfiguram continuamente as posições competitivas ao longo do tempo (Schumpeter, 1942). A abordagem evolucionária amplia essa perspectiva ao enfatizar que a mudança tecnológica decorre de processos de aprendizagem, rotinas organizacionais e mecanismos de seleção, gerando persistência de especializações e assimetrias entre países e organizações (Nelson; Winter, 1982). Nesse contexto, as patentes constituem *proxies* do esforço inventivo, pois registram conhecimento codificado, sinalizam estratégias de apropriabilidade e permitem observar padrões de continuidade e recombinação tecnológica (Griliches, 1990).

O conceito de regimes tecnológicos fornece base analítica para explicar por que diferentes campos apresentam estruturas inovativas distintas. Regimes com elevada cumulatividade, base científica e alta apropriabilidade tendem a concentrar capacidades em polos específicos, onde convergem infraestrutura de pesquisa, capital humano e políticas públicas (Franco Malerba; Luigi Orsenigo, 1997). Estudos recentes indicam que a evolução tecnológica também depende da natureza dos domínios científicos e da organização do conhecimento (Coccia; Roshani, 2025). Em campos emergentes e complexos, a recombinação ocorre em núcleos relativamente estáveis, conectados a aplicações periféricas, o que ajuda a explicar situações em que a expansão do número de atores não se traduz em maior densidade colaborativa, como observado em computação quântica (Xin; Man; Yi, 2021).

Neste estudo, esses conceitos são operacionalizados por meio de análise patentométrica e de redes de colaboração. A cumulatividade é aproximada pela evolução temporal dos depósitos de patentes, como *proxy* do acúmulo e da persistência do conhecimento tecnológico. A intensidade científica é captada pela participação de universidades e institutos de pesquisa entre os principais depositantes, sendo complementada, quando possível, por vínculos entre ciência e tecnologia, como citações científicas em patentes. A apropriabilidade é analisada a partir do uso de patentes como instrumento de proteção em setores estratégicos, como energia, telecomunicações e defesa, em conjunto com padrões de concentração tecnológica e estratégias de proteção observadas nos dados.

A dimensão territorial da inovação é abordada pela literatura de Sistemas Nacionais de Inovação, que sustenta que o desempenho tecnológico depende da articulação entre universidades, institutos de pesquisa, empresas, financiamento público e marcos institucionais que regulam a produção e difusão do conhecimento (Freeman, 1987; Lundvall, 1992). A proximidade geográfica e tecnológica favorecem interações inovativas reduzindo custos de coordenação e facilitando a circulação de conhecimento tácito (Gonçalves; Fajardo, 2011). Tecnologias associadas à segurança da informação e à infraestrutura crítica inserem-se em contextos regulatórios nos quais decisões de cooperação, proteção do conhecimento e internacionalização são influenciadas por estratégias nacionais de desenvolvimento científico e tecnológico (OECD, 2025a; Ferreira; Lipiäinen; Polito, 2023).

Além disso, estudos recentes destacam processos de concentração de ativos intelectuais e controle tecnológico em setores intensivos em conhecimento, com implicações para difusão e competição internacional (Rikap, 2021). Tais dinâmicas indicam que a análise da inovação deve considerar o volume de produção tecnológica, bem como sua estrutura organizacional e os padrões de articulação entre atores. Nesse sentido, a utilização de dados de patentes combinada à análise de redes sociais constitui abordagem adequada para examinar a organização do conhecimento tecnológico (Jiang; Chen, 2021), a estrutura de cooperação e os padrões de convergência entre bases científicas e aplicações tecnológicas, especialmente em domínios emergentes de alta complexidade científica e tecnológica, como são as comunicações quânticas. É a partir desse referencial que este estudo busca interpretar a emergência da comunicação quântica, conectando os conceitos de regimes tecnológicos, sistemas nacionais de inovação e redes de cooperação às evidências empíricas obtidas via patentometria.

3. Aspectos metodológicos

3.1 Estratégia de coleta e pré-processamento dos dados

Para investigar a dinâmica inventiva da comunicação quântica e seus padrões de cooperação, foi necessário construir uma base de dados e comparável de patentes. Nesse sentido, a coleta concentrou-se no Derwent Innovations Index (DII), reconhecido pela abrangência e padronização das informações patentárias (Mao et al., 2022). A estratégia de recuperação foi delineada para capturar especificamente o domínio tecnológico da comunicação quântica, com ênfase em protocolos de Distribuição Quântica de Chaves (QKD) e aplicações associadas.

A string de recuperação, o horizonte temporal, a data de extração e os resultados são apresentados na Tabela 1. A estratégia de busca combinou termos técnicos, protocolos e códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC), com operadores de proximidade e filtros de exclusão para reduzir falsos positivos, especialmente aqueles relacionados à computação quântica e ao sensoriamento quântico sem aderência ao escopo do estudo.

Tabela 1 - Estratégia de busca no Derwent Innovations Index

Informações	Data
Estratégia de busca (<i>string</i> de recuperação)	CTB=((Quantum OR QKD) NEAR5 (Key ADJ Distribution OR *Crypt* OR Communicat*)) AND CTB=(B92 OR GG02 OR BB84 OR E91 OR BBM92 OR MSZ96 OR SARG04 OR KMB09 OR HDQKD OR T12 OR MDI) AND CTB=(Six-state OR DPS OR Decoy ADJ state OR COW OR Information ADJ reconciliation OR "Prepare and measure" OR Device ADJ independent OR Twin ADJ Fields OR eavesdropp*) AND AIC=(H04L000900 OR H04L000908 OR H04B001011 OR H04B001080 OR H04K000300 OR G02F000202 OR H04B000354) NOT CTB=(Quantum ADJ Comput* OR Quantum ADJ Sens*)
Período	1998-2025 (até outubro de 2025)
Data de coleta	28 de Outubro de 2025
Nível de hierarquia	Subgrupo no âmbito da Classificação Internacional de Patentes (IPC)
Resultados	195 famílias de patentes (patent families)

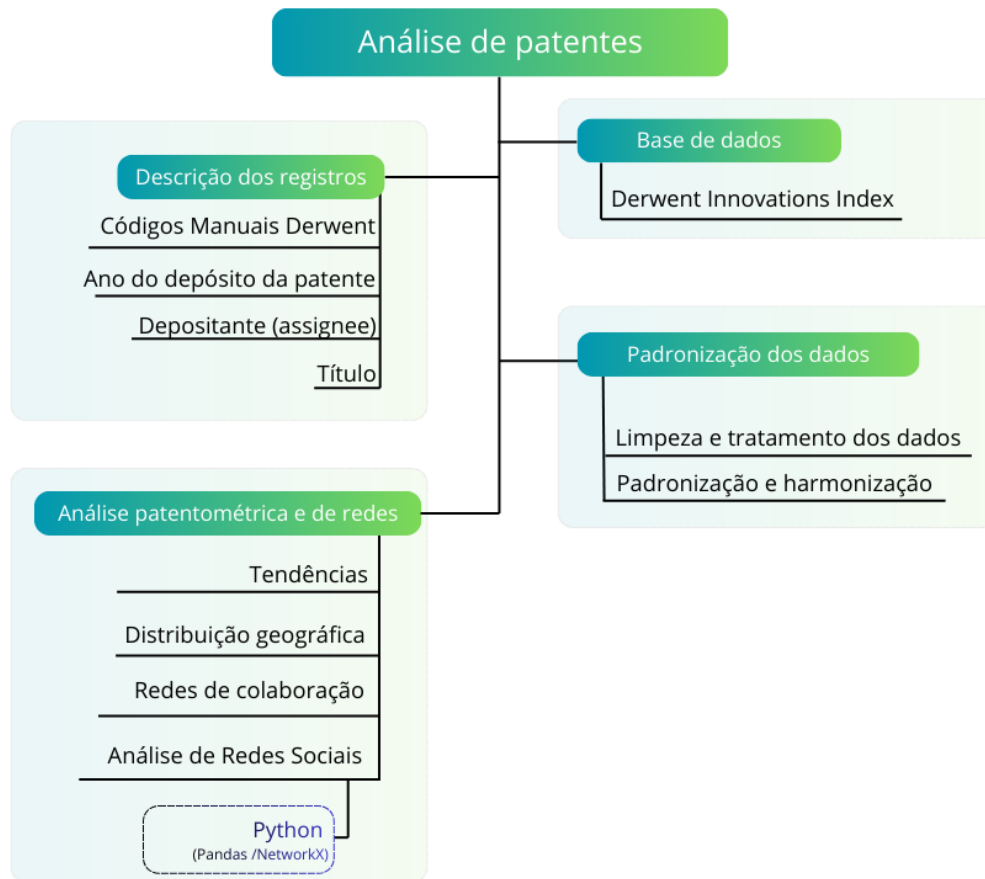
Fonte: Elaborado pelos autores

O período analisado compreendeu 1998-2025 (até outubro de 2025). Após a extração inicial, realizou-se o pré-processamento para assegurar consistência e comparabilidade. Foi empregada como unidade analítica a família de patentes, conforme definição disponibilizada na base DII/Derwent, por consolidar depósitos equivalentes em múltiplos escritórios e reduzir duplicidades, refletindo o esforço inventivo e a estratégia de proteção internacional. Ao final do tratamento e filtragem, obteve-se uma amostra de 195 famílias de patentes no nível hierárquico de subgrupos e no âmbito da Classificação Internacional de Patentes (IPC).

No pré-processamento, foram organizados e padronizados campos descritivos e classificatórios relevantes do DII, incluindo o campo CTB (utilizado para recuperação textual por palavras-chave e protocolos) e os campos de Classificação internacional de Patentes - IPC (empregados para delimitação do escopo e redução de falsos positivos), além de variáveis temporais, geográficas e institucionais. Realizou-se também a padronização e harmonização dos depositantes (assignees) para reduzir fragmentação decorrente de variações ortográficas e diferentes formas de registro institucional, mantendo-se o nível de identificação disponível na base, sem agregações externas por grupo econômico. As análises temporais adotaram como referência principal o ano do depósito da patente, por representar com maior proximidade o momento do esforço inventivo.

A base consolidada foi estruturada para suportar análises patentométricas (depositantes, tendências, distribuição tecnológica e geográfica) e Análise de Redes Sociais (ARS). Para fins de cooperação institucional, definiu-se colaboração como co-depósito (co-assignee) no âmbito de uma mesma família de patentes. O encadeamento das etapas de recuperação, pré-processamento e análise estatística e de redes é sintetizado na Figura 1 que representa o fluxo metodológico adotado no estudo.

Figura 1- Fluxo metodológico do estudo



Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 Análise de redes sociais

Para além da análise quantitativa das patentes, tornou-se essencial compreender como os atores institucionais e tecnológicos se relacionam entre si. A Análise de Redes Sociais (ARS) foi empregada justamente para revelar padrões de cooperação e convergência tecnológica, permitindo observar o volume de produção inventiva e sua estrutura relacional. Foram construídas duas redes complementares: (i) Rede de cooperação institucional, baseada em co-titularidade de famílias de patentes, que evidencia vínculos entre universidades, empresas e institutos de pesquisa; (ii) Rede tecnológica de coocorrência de IPC, voltada à identificação de subdomínios frequentemente combinados em um mesmo ativo, revelando rotas de convergência e complementaridade. Ambas as redes foram construídas de forma agregada para o período 1998-2025, considerando relações observadas no período analisado.

A rede de cooperação institucional foi representada por um grafo não direcionado $G = (V, E)$, em que V corresponde ao conjunto de depositantes (*assignees*) e E ao conjunto de relações de co-titularidade (*co-assignee*) observadas no nível de famílias de patentes. A matriz de adjacência $A = [a_{ij}]$ foi definida como $a_{ij} = 1$ quando os depositantes i e j compartilham ao menos uma família de patentes e $a_{ij} = 0$ caso contrário, caracterizando uma rede não ponderada. Múltiplas co-titularidades entre um mesmo par de instituições foram colapsadas em uma única ligação binária ($a_{ij} = 1$). Registros com único depositante foram mantidos para composição do conjunto de nós, resultando em nós isolados quando não há co-titularidade.

A conectividade global foi avaliada por meio da densidade, definida como a proporção entre o número de ligações observadas L e o total de ligações possíveis entre N nós (Zhong et al., 2019; Yoon, Park; Kim, 2013):

$$D = \frac{L}{\frac{N(N-1)}{2}} \quad (01)$$

No nível dos nós, a conectividade local foi mensurada pelo grau absoluto k_i , definido como o número de vínculos diretos estabelecidos por cada instituição, equivalente à centralidade de grau não normalizada. Formalmente:

$$k(P_k) = \sum_{i=1}^N a(P_i, P_k) \quad (02)$$

em que $a(P_i, P_k) = 1$ quando P_i e P_k estão conectados por relação de co-titularidade e $a(P_i, P_k) = 0$ caso contrário. Para fins de robustez analítica e redução de ruído decorrente de nós periféricos, as análises de estrutura e centralidade concentraram-se na sub-rede composta por instituições com grau mínimo $k_i \geq 2$.

Para captar relevância estrutural para além do número de conexões, incorporando influência relacional indireta, aplicou-se o PageRank, apropriado para redes de difusão por diferenciar nós conectados a parceiros também altamente conectados. O PageRank foi estimado conforme:

$$w(P_i) = \frac{1-d}{N} + d \sum_{P_k \in M(P_i)} \frac{w(P_k)}{L(P_k)} \quad (03)$$

em que $w(P_i)$ representa a importância relativa do nó P_i , $M(P_i)$ é o conjunto de vizinhos de P_i , $L(P_k)$ corresponde ao grau do nó P_k , e d é o fator de amortecimento, fixado em 0,85 (Zhong et al., 2019). Adicionalmente, foram reportados indicadores estruturais para caracterização da rede, incluindo o número de componentes conectados e o tamanho do maior componente, permitindo avaliar fragmentação e coesão relacional.

Complementarmente, foram construídas duas redes adicionais: (i) a rede tecnológica de coocorrência de IPC, formada pelas classificações atribuídas às famílias de patentes, em que cada nó representa uma classe e as arestas indicam combinações frequentes entre subdomínios; e (ii) a rede bipartida depositante $\leftrightarrow$ IPC, que conecta diretamente instituições e domínios tecnológicos, permitindo observar como universidades, empresas e institutos de pesquisa se vinculam às diferentes rotas tecnológicas. Essas redes permitem caracterizar tanto a estrutura do espaço tecnológico quanto a articulação entre atores institucionais e categorias técnicas, subsidiando a interpretação das trajetórias inventivas e dos padrões de convergência da comunicação quântica.

As análises foram implementadas em Python versão 3.14.2, utilizando os pacotes Pandas 2.2.3 e NetworkX 3.4.2, assegurando reprodutibilidade no ambiente computacional especificado.

4. Discussão e resultados

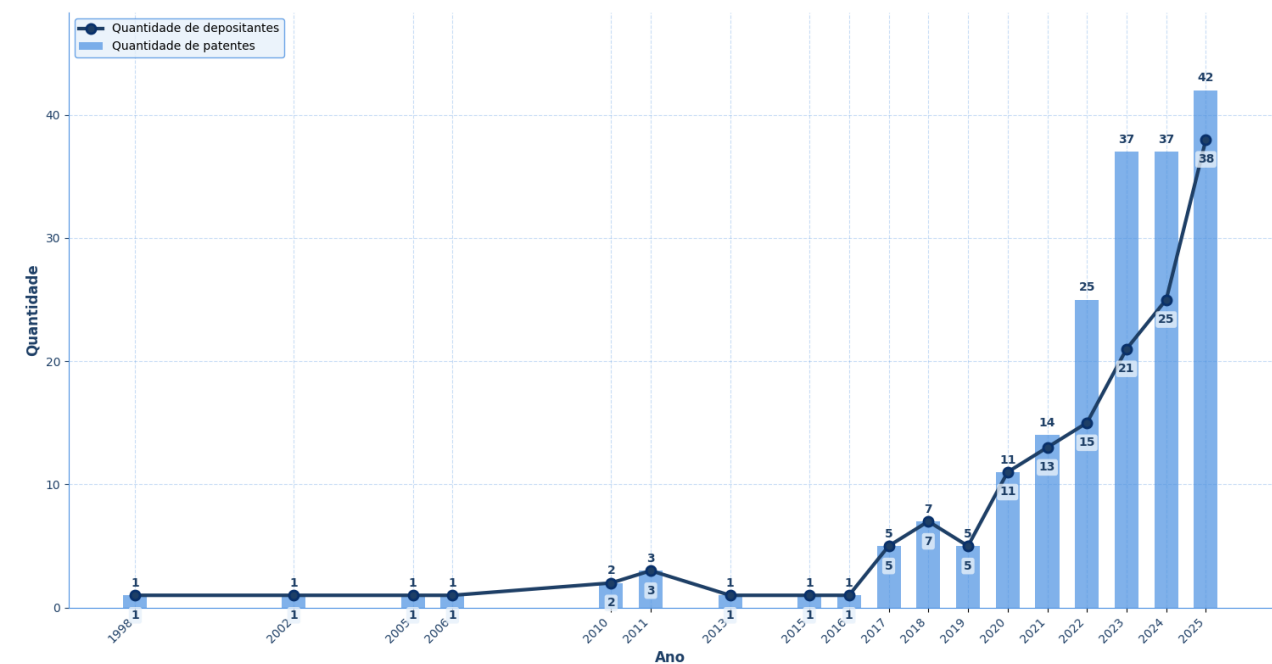
Nesta seção, apresentam-se as evidências empíricas extraídas da análise das 195 famílias de patentes, estruturadas em três dimensões: a evolução temporal da atividade inventiva, a configuração geográfica e institucional, e a topologia das redes de cooperação e coocorrência tecnológica.

4.1 Evolução temporal e mudança no regime

O Gráfico 1 evidencia três fases distintas na trajetória da comunicação quântica. Entre 1998 e 2016, observa-se um estágio inicial de baixa intensidade inventiva, com depósitos esporádicos de patentes. Nos anos de 2017 e 2018, emerge uma fase de transição, marcada por sinais de maior mobilização tecnológica. A partir de 2019, verifica-se uma aceleração significativa, indicando que barreiras técnicas começaram a ser superadas e que aplicações setoriais passaram a se consolidar, intensificando o patenteamento como mecanismo de apropriação tecnológica. Até 2019, a quantidade de depositantes manteve-se bastante próximo do número de patentes, sugerindo que cada ator institucional contribuía, em média, com um único depósito por ano, o que é típico de campos emergentes em fase exploratória. Esse comportamento dialoga com a literatura sobre ciclos de vida de tecnologias disruptivas. Embora Coccia e Roshani (2025) analisem especificamente a computação quântica, suas conclusões sobre a transição de fases emergentes para crescimento acelerado quando a viabilidade técnica é comprovada podem ser estendidas, por analogia, ao domínio da comunicação quântica. Estudos voltados diretamente para esse campo (Pirandola et al., 2020; Chen; Tsai, 2025) reforçam que a aceleração recente decorre da maturação de protocolos de Distribuição Quântica de Chaves (QKD) e da expansão de aplicações em setores estratégicos, como telecomunicações, defesa e finanças.

No caso da comunicação quântica, a aceleração pós-2019 sugere maior cumulatividade e apropriabilidade, características de regimes tecnológicos que favorecem concentração em polos específicos. Esses polos correspondem principalmente à China, Estados Unidos, Japão e algumas economias europeias, onde infraestrutura científica, capacidade de P&D e políticas de inovação convergem para sustentar o avanço inventivo e moldar o ritmo da difusão internacional (Malerba; Orsenigo, 1997; Freeman, 1987; Lundvall, 1992; Mota, 2022). Tais resultados convergem com Aboy, Missen e Kop (2022).

Gráfico 1 - Evolução dos depósitos de patentes em Comunicação quântica, 1998-2025



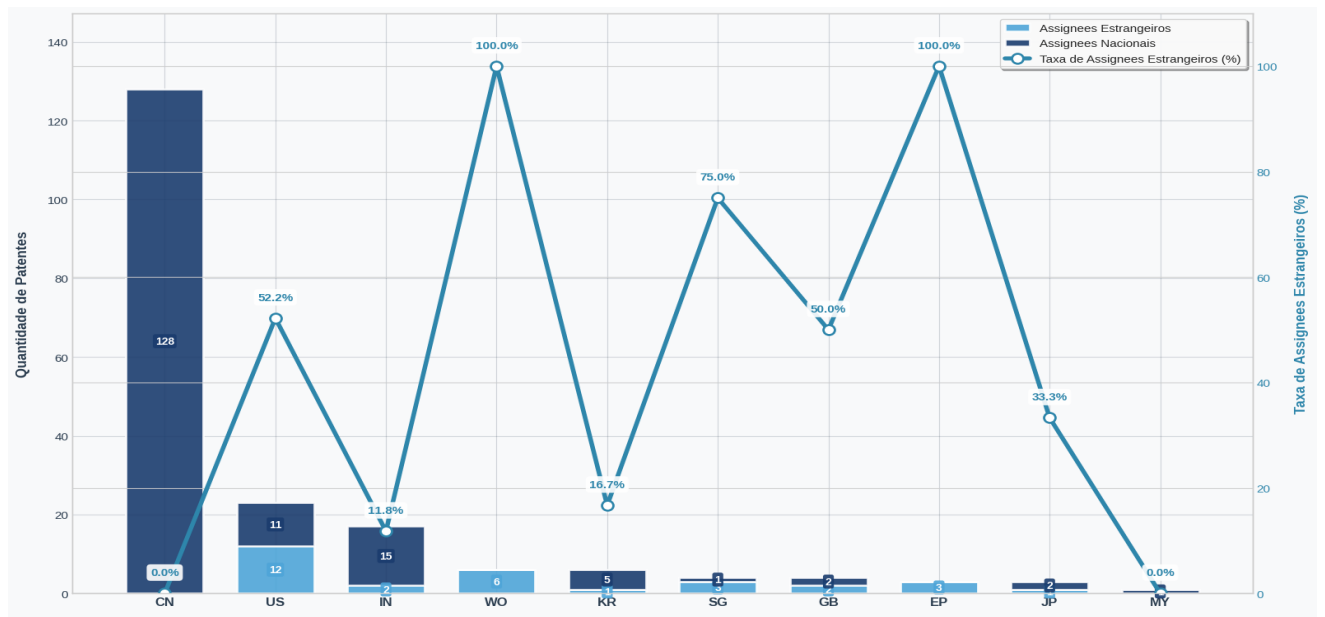
Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

4.2 Distribuição geográfica e perfil institucional

O Gráfico 2 evidencia a forte concentração geográfica da atividade inventiva em comunicação quântica. A China lidera em número absoluto de depósitos, com predominância de *assignees* nacionais e baixa internacionalização, resultado de uma estratégia endógena alinhada ao programa *Made in China 2025*, que prioriza tecnologias críticas e reforça a soberania digital. Em contraste, os Estados Unidos apresentam equilíbrio entre *assignees* nacionais e estrangeiros, indicando maior abertura e internacionalização. A Europa também se destaca, sustentada por iniciativas como o *European Quantum Flagship*, que articulam universidades, empresas e centros de pesquisa em torno de metas comuns e reforçam a cooperação institucional e a internacionalização das capacidades científicas e tecnológicas.

Esse padrão acompanha os investimentos públicos. Segundo a Qureca (2025), programas nacionais já somam mais de US\$ 56,7 bilhões, com destaque para China (USD 15,3 bilhões), Estados Unidos (USD 7,67 bilhões) e Europa (mais de USD 13 bilhões somados). Em contraste, países do Sul Global, como o Brasil (USD 79 milhões) e a África do Sul (USD 10,7 milhões), apresentam valores marginais, o que confirma barreiras estruturais para inserção internacional em tecnologias intensivas em ciência. Ainda assim, iniciativas como o *Quantum Industrial Innovation* (QuIIN) e projetos em CV-QKD sinalizam oportunidades de inserção como *latecomer* estratégico no Brasil, desde que articuladas a políticas industriais e científicas capazes de aproveitar janelas de oportunidade e conectar esforços acadêmicos e empresariais a redes internacionais de cooperação.

Gráfico 2 - Distribuição geográfica dos depósitos de patentes em Comunicação quântica, 1998-2025



Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

A Tabela 2 revela a configuração institucional dos principais depositantes em comunicação quântica, destacando a predominância de universidades e institutos de pesquisa, sobretudo na China. A Nanjing University of Posts and Telecommunications ocupa a primeira posição, com 24 patentes e elevado número de cooperações entre inventores, confirmando o papel central da base científica na emergência do campo. Outras universidades chinesas, como a South China Normal University (9 patentes) e a Beijing University of Posts and Telecommunications (4 patentes), também figuram entre os líderes, reforçando a importância da infraestrutura acadêmica para sustentar o avanço inventivo.

Entre as empresas, observa-se a presença crescente de atores especializados, como a Guangdong National Quantum Technology Co. Ltd. (14 patentes) e a Ruban Quantum Technology Co. Ltd. (4 patentes), além de grandes corporações como a Huawei e a State Grid Corporation of China, que articulam esforços de P&D com aplicações em setores de energia e telecomunicações. Fora da China, destacam-se a britânica Arqit Ltd., com seis patentes, e a japonesa Toshiba, com quatro, evidenciando a inserção de empresas de países avançados em nichos específicos de aplicação. Instituições de pesquisa

da Índia (Indian Institute of Technology Madras), Coreia do Sul (Electronics & Telecom Research Institute) e Espanha (Institut Catalana de Recerca i Estudis Avançats) também aparecem na lista, sinalizando a diversificação geográfica, ainda que em menor escala. No entanto, a baixa cooperação institucional confirma que a competição por apropriação ainda supera incentivos à colaboração, o que limita a difusão mais ampla da tecnologia em sua fase emergente.

Tabela 2 - Distribuição dos top 25 depositantes em comunicação quântica, 1998-2025

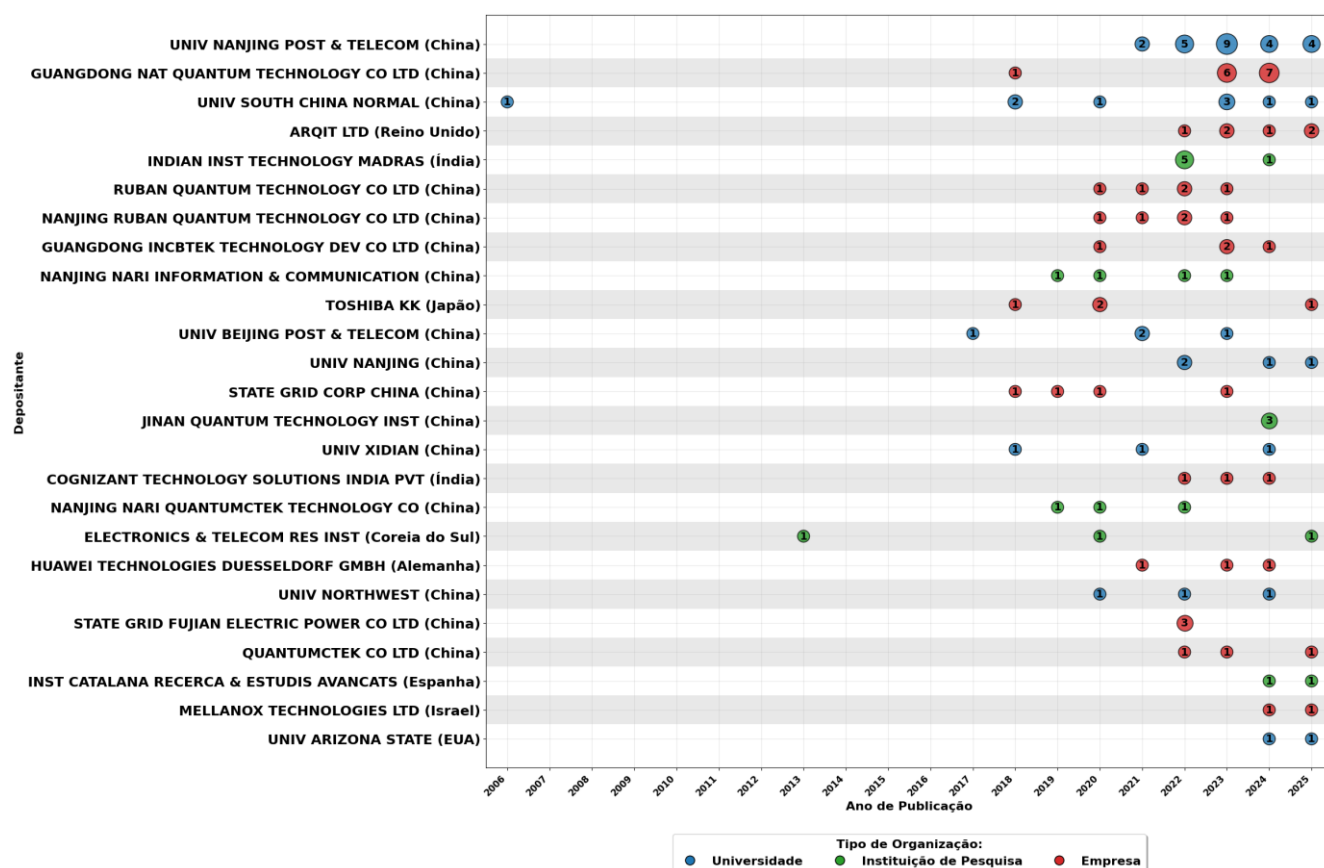
No	Depositante	Tipo de Organização	País	Qtd. Patentes	Qtd. Cooperação de inventores de patentes	Qtd. Cooperação de instituições
1	Univ Nanjing Post & Telecom	Universidade	China	24	91	1
2	Guangdong Nat Quantum Technology Co Ltd	Empresa	China	14	45	1
3	Univ South China Normal	Universidade	China	9	43	3
4	Arqit Ltd	Empresa	Reino Unido	6	20	0
5	Indian Inst Technology Madras	Instituição de Pesquisa	Índia	6	21	0
6	Ruban Quantum Technology Co Ltd	Empresa	China	5	15	1
7	Nanjing Ruban Quantum Technology Co Ltd	Empresa	China	5	15	1
8	Guangdong Incbtek Technology Dev Co Ltd	Empresa	China	4	18	2
9	Nanjing Nari Information & Communication	Instituição de Pesquisa	China	4	74	8
10	Toshiba Kk	Empresa	Japão	4	17	2
11	Univ Beijing Post & Telecom	Universidade	China	4	17	2
12	Univ Nanjing	Universidade	China	4	11	0
13	State Grid Corp China	Empresa	China	4	63	9
14	Jinan Quantum Technology Inst	Instituição de Pesquisa	China	3	9	0
15	Univ Xidian	Universidade	China	3	21	0
16	Cognizant Technology Solutions India Pvt	Empresa	Índia	3	9	0
17	Nanjing Nari Quantumctek Technology Co	Instituição de Pesquisa	China	3	48	7
18	Electronics & Telecom Res Inst	Instituição de Pesquisa	Coreia do Sul	3	31	1
19	Huawei Technologies Duesseldorf Gmbh	Empresa	Alemanha	3	3	0
20	Univ Northwest	Universidade	China	3	17	0
21	State Grid Fujian Electric Power Co Ltd	Empresa	China	3	49	8
22	Quantumctek Co Ltd	Empresa	China	3	11	0
23	Inst Catalana Recerca & Estudis Avancats	Instituição de Pesquisa	Espanha	2	11	3
24	Mellanox Technologies Ltd	Empresa	Israel	2	10	0
25	Univ Arizona State	Universidade	EUA	2	8	1

Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

O Gráfico 3 confirma a trajetória já observada nos resultados anteriores: até meados da década de 2010, os depósitos de patentes eram esparsos e concentrados em universidades e institutos de pesquisa, sobretudo na China. A partir de 2018, nota-se uma intensificação gradual, com maior regularidade nos depósitos e a entrada de empresas especializadas, o que reforça o papel da infraestrutura acadêmica como núcleo inicial do campo e a posterior diversificação institucional.

Após 2019, observa-se uma aceleração significativa, em linha com o padrão identificado no Gráfico 1 e Tabela 2. Nesse período, empresas como Guangdong National Quantum Technology Co. Ltd. e State Grid Corporation of China, Arqit Ltd, QuantumCTek, Toshiba, Huawei ampliam sua presença, enquanto universidades mantêm protagonismo. A evolução temporal reafirma que a comunicação quântica passou de um estágio exploratório acadêmico para uma fase de crescimento, marcada pela combinação entre base científica e expansão empresarial em setores econômicos, sobretudo, telecomunicações, energia, defesa, finanças e segurança da informação.

Gráfico 3 - Evolução temporal dos depósitos de patente dos 25 principais depositantes, 2006-2025



Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

A Tabela 3 evidencia a concentração das tecnologias centrais em comunicação quântica nos principais depositantes. Universidades como a Nanjing University of Posts and Telecommunications aparecem com múltiplos registros recentes, explorando protocolos diversos de distribuição de chaves quânticas e métodos de autenticação, o que confirma o papel da base científica na diversificação tecnológica. Empresas como Toshiba e Huawei concentram esforços em soluções aplicadas, voltadas para transmissão óptica e sincronização em protocolos de Distribuição quântica com variáveis contínuas (CV-QKD), enquanto a QuantumCTek investe em chips ópticos e métodos de comunicação direta. Esses dados mostram que universidades lideram em diversidade tecnológica, explorando diferentes arquiteturas, enquanto empresas avançam em soluções voltadas para eficiência e segurança operacional.

Essa configuração reafirma a assimetria institucional típica de campos emergentes: universidades e institutos de pesquisa acumulam capacidades científicas e exploram múltiplas frentes de desenvolvimento, enquanto empresas concentram esforços em aplicações específicas e comercialmente viáveis. O padrão observado confirma que a trajetória da comunicação quântica combina diversidade acadêmica com foco empresarial, em linha com estudos sobre regimes tecnológicos e redes de inovação (Powell; Grodal, 2005; Rikap, 2021; Jiang; Chen, 2021). Nesse contexto, cabe destacar que no Brasil iniciativas como o Centro de Competência EMBRAPPII CIMATEC têm empreendido esforços em CV-QKD, indicando que, embora os dados de patentes ainda não evidenciem o país no cenário internacional, há investimentos em capacitação técnica e formação voltados para essa frente, com vistas à aplicação em setores econômicos e industriais.

Tabela 3 - Patentes core dos 25 principais depositantes em comunicação quântica, 1998-2025

Número da Publicação	Data de Depósito	Título	Depositante
US12362833B2	27/02/2023	Transmissor óptico para sistema de distribuição quântica de chaves	Kabushiki Kaisha Toshiba
CN116015482B	03/01/2023	Método de autenticação de identidade multi-quântica baseado em comunicação direta segura multi-quântica	Nanjing University of Posts and Telecommunications
US12164631B2	07/12/2022	Distribuição quântica de chaves em múltiplos comprimentos de onda para maior segurança contra-ataques de divisão de número de fótons e maiores taxas de dados	Arizona Board of Regents
CN115801242B	09/11/2022	Método de diálogo quântico independente de dispositivo de medição baseado em troca de emaranhamento	Nanjing University of Posts and Telecommunications
US12381722B2	01/08/2022	Interconexões quânticas bidirecionais	Mellanox Technologies Ltd.
US11522689B2	26/01/2022	Dispositivo de distribuição quântica de chaves configurável com múltiplos protocolos	Nanjing University of Posts and Telecommunications
CN115955299B	08/10/2021	Chip óptico para distribuição quântica de chaves e sistema de distribuição de chaves quânticas	QuantumCTek Co., Ltd.
EP4183067A4	13/07/2021	Método e sistema para rede de distribuição quântica de chaves independente de dispositivo de medição	National University of Singapore
US11736282B2	09/07/2021	Sincronização pós-recepção em sistema de distribuição quântica de chaves de variáveis contínuas (CV-QKD)	Huawei Technologies
US11888978B1	08/06/2021	Sistemas e métodos para distribuição quântica de chaves independente de dispositivo de medição	Cable Television Laboratories Inc.
EP4047861B1	14/04/2021	Método e sistema para distribuição quântica de chaves	Terra Quantum AG
US11438149B2	11/12/2020	Método e sistema de distribuição quântica de chaves baseado em rede QKD em árvore	State Grid Fujian Electric Power
EP3884610B1	24/10/2019	Sincronização pós-recepção em sistema de distribuição quânticas de chaves de variáveis contínuas (CV-QKD)	Huawei Technologies
US1041804B2	02/01/2018	Sistema e método para comunicação usando momento angular orbital com modulação em múltiplas camadas sobrepostas	NXGEN Partners IP LLC
US10666433B2	12/09/2017	Vazamento de informação na distribuição quântica de chaves devido a retroespalhamento em fotodiodos de avalanche de fóton único	The MITRE Corporation

Fonte: Elaboração dos autores a partir do *Derwent Innovations Index*

4.3 Redes de colaboração e coocorrência tecnológica

A análise das redes de cooperação é fundamental porque permite compreender o volume de produção inventiva e a forma como o conhecimento circula entre instituições. Em campos emergentes, como a comunicação quântica, a estrutura relacional revela o grau de difusão tecnológica, a presença de núcleos centrais e a capacidade de articulação entre universidades, empresas e institutos de pesquisa. Essa dimensão complementa a análise quantitativa das patentes, indicando se o avanço ocorre de forma colaborativa ou fragmentada.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros globais da rede de colaboração inventiva em comunicação quântica entre 1998 e 2025. A rede é composta por 18 nós e 24 arestas, com grau médio de 2,667, densidade de apenas 0,157 e diâmetro igual a 1. Esses indicadores revelam uma estrutura pouco conectada, fragmentada e com baixa coesão relacional, indicando limitada difusão do conhecimento inventivo. Ademais, a baixa incidência de patentes em copropriedade sugere preferência por estratégias de proteção individualizadas, o que é consistente com tecnologias críticas para a segurança nacional, nas quais organizações tendem a preservar o controle tecnológico e evitar a fragmentação de direitos. Em termos empíricos, esse padrão está em linha com outros campos emergentes da tecnologia quântica, como a computação quântica, nos quais a expansão do número de atores não implica aumento proporcional da densidade colaborativa (Coccia; Roshani; Mosleh, 2025).

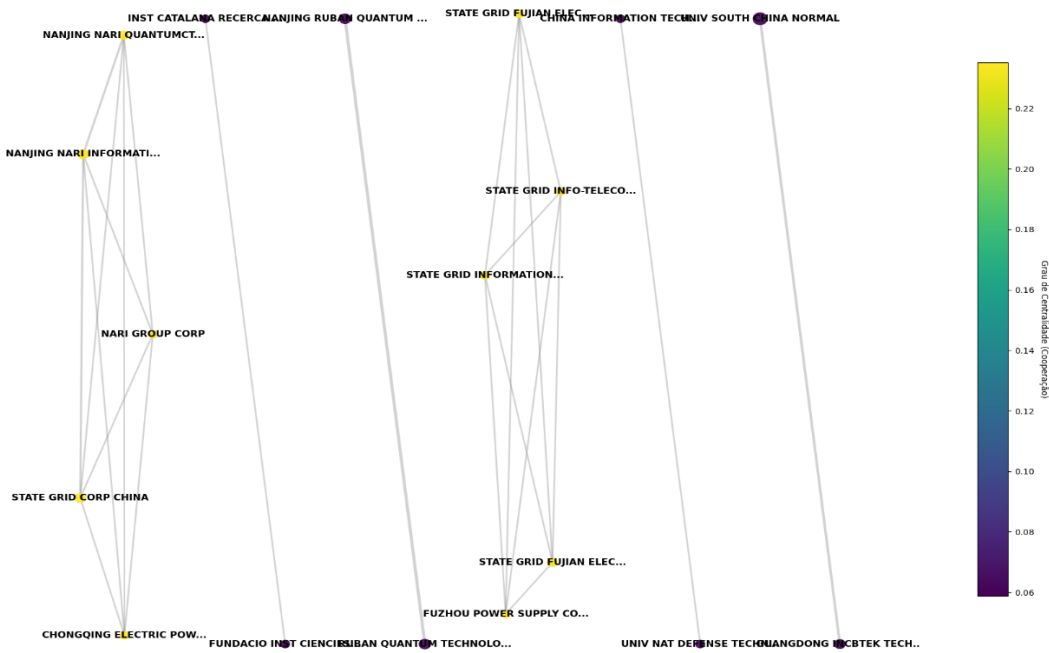
Tabela 4 - Parâmetros da rede de colaboração inventiva em Comunicação quântica, 1998-2025

Período	Nós	Arestas	Grau médio	Densidade da rede	Diâmetro da rede
1998-2025	18	24	2,667	0,157	1

Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

O Gráfico 4 mostra a rede de cooperação entre depositantes de patentes, considerando apenas conexões com grau ≥ 2 . Observa-se que poucas universidades chinesas concentram a maior parte das conexões, como a Nanjing University of Posts and Telecommunications e a University of Science & Technology of China. Empresas como QuantumCTek e Guangdong National Quantum Technology aparecem, mas em menor escala. A predominância acadêmica confirma que o núcleo inventivo ainda é sustentado pela pesquisa universitária.

Gráfico 4 - Rede de cooperação entre depositantes em tecnologias de comunicação quântica



Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

Nota: contagem de conexões ≥ 2

A Tabela 5 apresenta os dez principais depositantes de patentes em comunicação quântica classificados segundo dois indicadores de centralidade: grau (número de conexões diretas na rede) e PageRank ponderado (importância relacional considerando a posição dos parceiros). No ranking por grau, observa-se predominância de empresas vinculadas ao setor elétrico e de telecomunicações da China, como NARI Group Corp, State Grid Info-Telecom Great Power Sci e Fuzhou Power Supply Co State Grid Fujian. Todas apresentam grau igual a 4, indicando múltiplas conexões diretas na rede de cooperação, o que evidencia que a infraestrutura energética e de telecomunicações chinesa ocupa papel central na apropriação tecnológica da comunicação quântica.

Já no ranking por PageRank ponderado, aparecem como mais influentes a Nanjing Nari Information & Communication (0,062), a Nanjing Nari QuantumCTek Technology Co (0,056) e a State Grid Corporation of China (0,056). Além das empresas, destacam-se instituições de pesquisa europeias como a Fundació Institut de Ciències Fotòniques e o Institut Catalana de Recerca i Estudis Avançats, que, embora com menor grau absoluto, alcançam relevância estrutural por estarem conectadas a parceiros centrais. Essa predominância de atores da mesma localidade reflete estratégias coordenadas de fortalecimento estatal e a concentração geográfica das capacidades inventivas em polos específicos. Observa-se que a cooperação ocorre majoritariamente dentro das fronteiras nacionais, resultado que corrobora a literatura sobre o papel fundamental da proximidade geográfica na dinâmica inventiva (Gonçalves; Fajardo, 2011; Hu *et al.*, 2024; Zhong *et al.*, 2019).

Tabela 5 - Top 10 depositantes com alto grau de conexões e PageRank

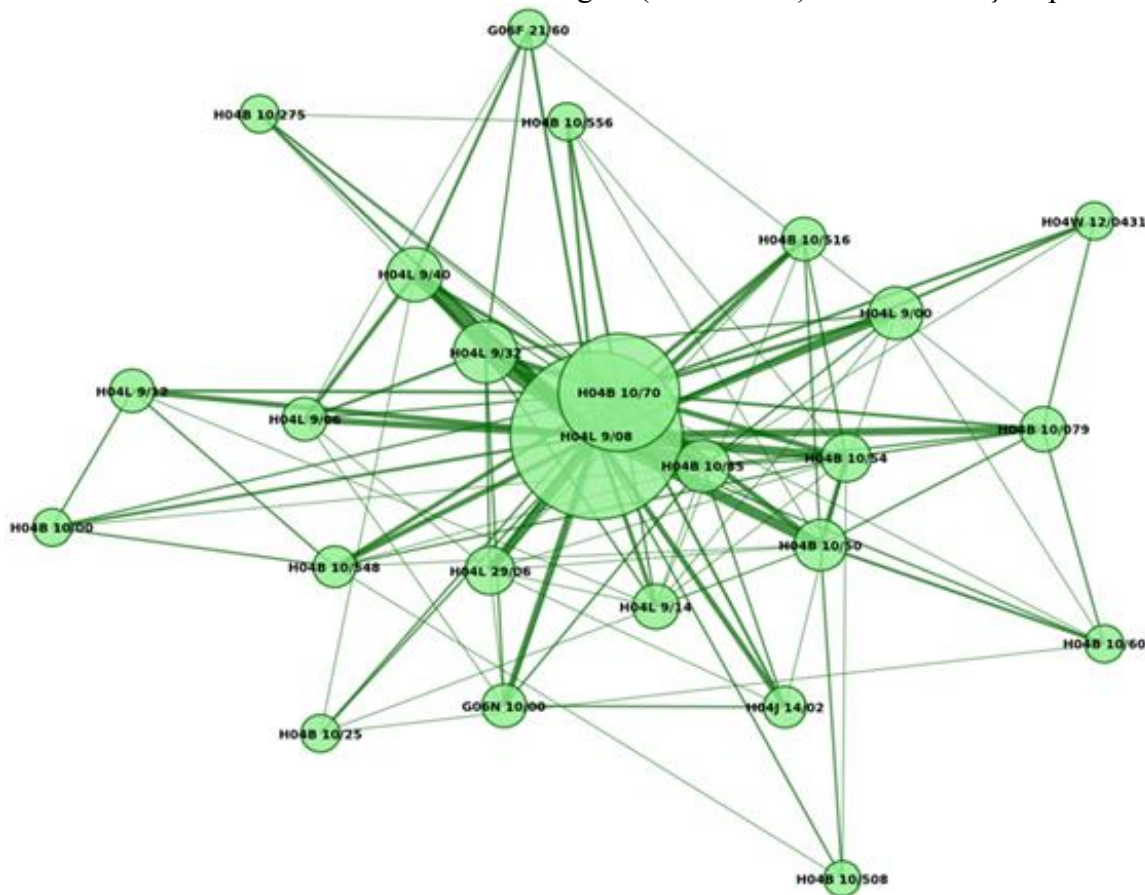
Nº	Depositante	Categoria	Grau	Nº	Depositante	Categoria	PageRank
1	Nari Group Corp	Empresa	4	1	Nanjing Nari Information & Communication	Empresa	0.062171
2	State Grid Info-Telecom Great Power SCI	Empresa	4	2	Nanjing Nari Quantumctek Technology Co	Empresa	0.056633
3	Fuzhou Power Supply Co State Grid Fujian	Empresa	4	3	State Grid Corp China	Empresa	0.056633
4	State Grid Information & Telecom Yili	Empresa	4	4	Fundacio Inst Ciències Fotòniques	Instituição de pesquisa	0.055556
5	State Grid Fujian Electric Power Co	Empresa	4	5	Guangdong Incbtek Technology Dev Co LTD	Empresa	0.055556
6	State Grid Fujian Electric Power Co Ltd	Empresa	4	6	China Information Technology Designing &	Governo	0.055556
7	Chongqing Electric Power Corp Informatio	Empresa	4	7	Inst Catalana Recerca & Estudis Avançats	Instituição de pesquisa	0.055556
8	Nanjing Nari Information & Communication	Empresa	4	8	State Grid Info-Telecom Great Power SCI	Empresa	0.055556
9	State Grid Corp China	Empresa	4	9	State Grid Information & Telecom Yili	Empresa	0.055556
10	Nanjing Nari Quantumctek Technology Co	Empresa	4	10	State Grid Fujian Electric Power Co	Empresa	0.055556

Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

O Gráfico 5 apresenta a rede de coocorrência tecnológica, construída a partir dos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC). O tamanho dos nós representa a frequência de cada tecnologia e a espessura das arestas indica a intensidade da coocorrência. A análise revela um núcleo centralizado na classe H04L 9/08 (Protocolos de distribuição de chaves), com 178 ocorrências, seguido pela H04K 3/00 (Comunicação quântica fotônica), com 85 registros. Tal evidência confirma a centralidade dos QKD na evolução recente da área, estruturando o eixo dominante da comunicação quântica.

Esse padrão é reforçado pela recorrência de categorias diretamente associadas à segurança da informação e à integridade de redes, como H04L 9/32 (Mecanismos de autenticação ou verificação de criptografia, 19 ocorrências), H04L 9/40 (Protocolos de segurança de rede, 13 ocorrências), H04L 9/00 (Arranjos para comunicação secreta ou segura, 12 ocorrências) e H04B 10/48 (Proteção contra falhas ou degradação em sistemas ópticos, 12 ocorrências). Essas tecnologias sustentam aplicações em telecomunicações, energia e defesa, confirmando a convergência entre segurança digital e transmissão óptica.

Gráfico 5 - Rede de coocorrência tecnológica (IPC ↔ IPC) em comunicação quântica



Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index
Nota: Conexões ≥ 1

A Tabela 6 sintetiza as 15 principais tecnologias desenvolvidas pelos principais depositantes, confirmando a centralidade da criptografia quântica (H04L 9/08) e da comunicação óptica (H04B 10/70) como eixos dominantes. Essas classes sustentam aplicações em telecomunicações, energia e defesa, indicando que o avanço inventivo está orientado para setores estratégicos de infraestrutura crítica. A diversidade de categorias secundárias mostra que o campo combina pesquisa científica com aplicações industriais, mas de forma fragmentada: poucos atores concentram competências centrais, enquanto a maioria contribui de maneira pontual, padrão típico de tecnologias emergentes (Rikap, 2021; Coccia; Roshani; Mosleh, 2025).

Tabela 6 - As 15 principais tecnologias desenvolvidas pelos 15 principais depositantes, 1998-2025

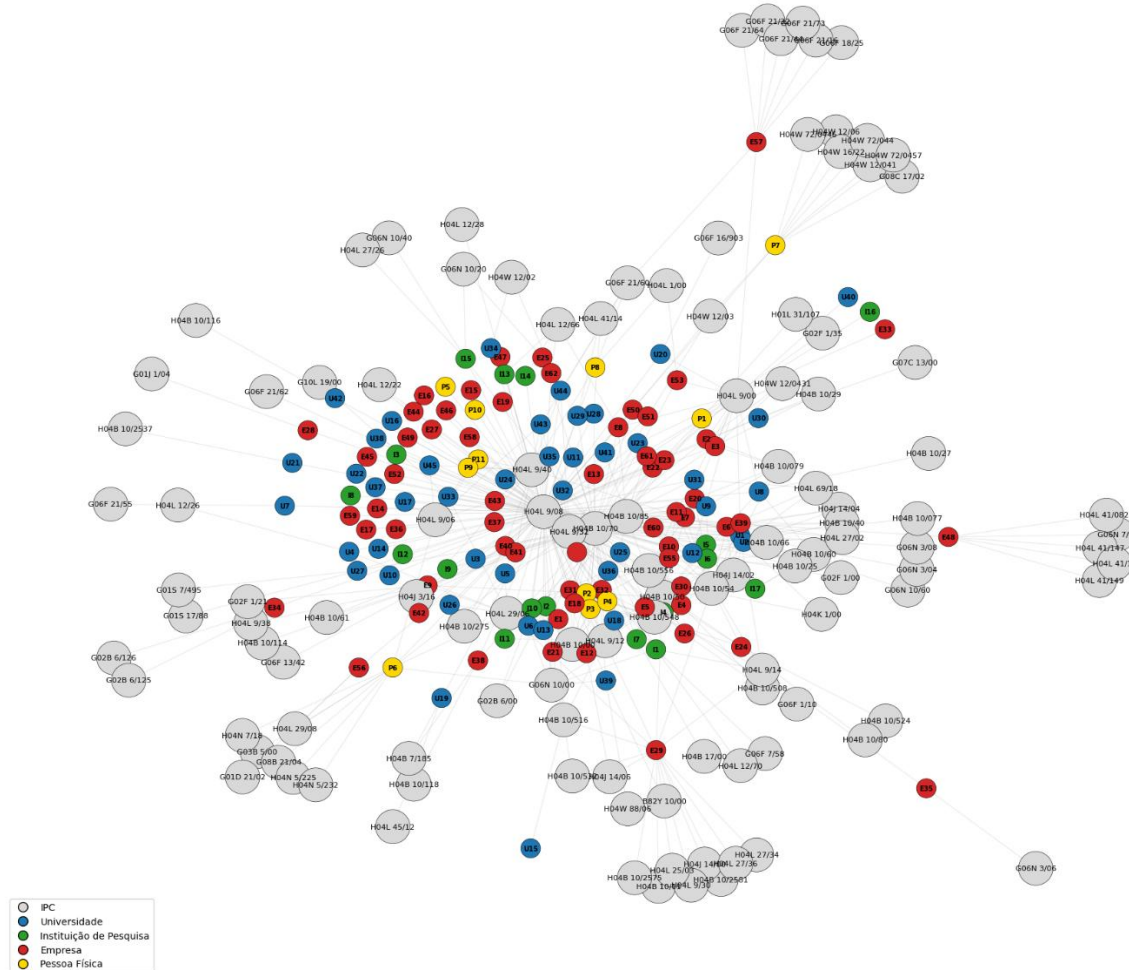
Nº	IPC	Descrição do IPC	Frequência	Grau	PageRank
1	H04L 9/08	Distribuição de chaves criptográficas	178	24	0.1274
2	H04B 10/70	Sistemas de comunicação óptica utilizando luz coerente ou quântica	85	22	0.0983
3	H04L 9/32	Verificação de identidade ou autorização de usuários em sistemas seguros	19	10	0.0421
4	H04L 9/40	Cifragem com características estruturais ou operacionais específicas	13	9	0.0358
5	H04B 10/85	Sistemas ópticos usando modulação ou multiplexação especiais	12	14	0.0452
6	H04L 9/00	Comunicação secreta ou segura	12	9	0.0315
7	H04B 10/50	Sistemas de transmissão óptica caracterizados pelo meio de propagação	11	14	0.0389
8	H04L 29/06	Protocolos de comunicação de dados	9	10	0.0287
9	H04B 10/54	Sistemas ópticos utilizando fibras especiais ou arranjos específicos	9	12	0.0364
10	H04L 9/14	Sistemas de cifragem usando múltiplas chaves ou algoritmos	7	10	0.0264
11	H04B 10/079	Transmissão óptica caracterizada por técnicas específicas de codificação	7	8	0.0231
12	G06N 10/00	Sistemas computacionais baseados em modelos quânticos	6	7	0.0218
13	H04B 10/516	Sistemas de comunicação óptica com controle de ruído ou interferência	6	6	0.0189
14	H04L 9/12	Cifragem com sincronização específica entre transmissor e receptor	6	5	0.0167
15	H04L 9/06	Aparelhos de cifragem baseados em registros de deslocamento ou blocos	6	7	0.0192

Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

Em suma, as tecnologias mais frequentes estruturam o núcleo técnico do setor e sustentam a consolidação de sistemas *quantum-safe*. A predominância das classes voltadas à gestão de chaves e arranjos fotônicos (Tabela 6) sinaliza a maturação de soluções como multiplexação por divisão de frequência (FDM)⁷ e modulação óptica, essenciais para a transição de experimentos laboratoriais para aplicações escaláveis em ambientes industriais, financeiros e de infraestrutura crítica.

Por fim, o Gráfico 6 exibe a rede bipartida Depositante ↔ Tecnologia (IPC), conectando instituições às classes tecnológicas da comunicação quântica. Universidades chinesas, como a Nanjing University of Posts and Telecommunications e a South China Normal University, aparecem como nós centrais ligados a múltiplos IPCs. Empresas como QuantumCTek, Guangdong National Quantum Technology e Huawei concentram-se em códigos de criptografia quântica e sistemas fotônicos, enquanto institutos como o Indian Institute of Technology Madras se vinculam a categorias específicas de protocolos de segurança.

Gráfico 6 - Rede bipartida Depositante ↔ Tecnologia (IPC) em comunicação quântica, 2mode



Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index

Nota: A descrição dos depositantes encontram-se no Anexo 1

A rede confirma baixa densidade e forte concentração em poucos atores, com predominância acadêmica e participação empresarial ainda restrita. As tecnologias mais conectadas estão voltadas à segurança da informação e transmissão óptica, aplicadas em setores como telecomunicações, energia e defesa. Esse padrão indica que o avanço técnico continua dependente da pesquisa universitária, mas já orientado para aplicações industriais e infraestrutura críticas. A fragmentação institucional sugere que a consolidação da comunicação quântica exigirá maior integração entre ciência e indústria e mecanismos de cooperação capazes de reduzir barreiras de difusão e ampliar a interoperabilidade global.

⁷ Técnica que combina múltiplos sinais de baixa largura de banda em um único meio de transmissão de alta capacidade, alocando uma faixa de frequência (portadora) distinta para cada sinal.

Considerações finais

Este estudo mostrou que a comunicação quântica permanece em estágio emergente, com aceleração da atividade inventiva após 2019, mas ainda marcada por baixo volume de patentes e redes de cooperação pouco densas. A China lidera em número de depósitos e concentra a maior parte das conexões, seguida por Estados Unidos, Japão e Europa. Universidades e institutos de pesquisa sustentam o núcleo inventivo, enquanto empresas como QuantumCTek, Guangdong National Quantum Technology, Ruban Quantum Technology e Huawei ampliam aplicações em energia, telecomunicações, defesa e finanças. As tecnologias mais conectadas concentram-se em criptografia quântica e protocolos de distribuição quântica de chaves (QKD), articuladas com sistemas fotônicos, evidenciando a convergência entre segurança digital e transmissão óptica.

A liderança chinesa não se explica apenas pelo volume de patentes, mas influenciada pela política de Estado voltada para soberania digital, exemplificada por programas como *Made in China 2025*. Essa estratégia prioriza tecnologias críticas e reduz dependência externa, reforçando o caráter endógeno do esforço inventivo. Em contraste, Estados Unidos e Europa apresentam maior internacionalização, com taxas elevadas de *assignees* estrangeiros, o que indica abertura e cooperação institucional mais intensa. Essa diferença geopolítica sugere que a difusão da comunicação quântica pode evoluir em direções distintas, com a possibilidade de fragmentação tecnológica entre blocos regionais.

Do ponto de vista econômico, a baixa cooperação institucional observada nas redes de patentes levanta implicações relevantes. Se mantida, pode resultar em padrões isolados de protocolos e internet quântica com implicações para interoperabilidade tecnológica e fluxos globais de dados. Isso impacta diretamente a dinâmica concorrencial, pois barreiras de entrada elevadas favorecem países com infraestrutura científica e investimentos massivos, enquanto limitam a inserção de economias emergentes. O setor industrial também é afetado: empresas que dominam QKD e sistemas fotônicos tendem a capturar mercados, tais como em energia, telecomunicações, infraestruturas críticas e defesa, consolidando vantagens competitivas de médio e longo prazo.

A baixa densidade das redes não é apenas um reflexo da fase inicial da tecnologia, mas decorre de fatores estruturais: a natureza *dual-use* da comunicação quântica (civil e militar), as restrições regulatórias ligadas à segurança nacional, a competição geopolítica por soberania digital e o controle de propriedade intelectual como ativo estratégico. Esses vetores explicam por que a cooperação institucional permanece limitada, mesmo em ambientes acadêmicos, e reforçam que a apropriação tecnológica é vista como questão de segurança e poder.

A hipótese inicial do estudo: “*de que a atividade inventiva apresenta crescimento recente e concentração em poucos polos, com redes colaborativas de baixa densidade*”, foi confirmada. Os resultados mostram que, embora haja expansão do número de atores, a cooperação permanece restrita e concentrada, compatível com um campo tecnológico emergente e ainda em consolidação, resultado em linha com a literatura relacionada às tecnologias quânticas (Aboy; Minssen; Kop, 2022; Pirandola et al., 2020; Chen; Tsai, 2025).

Para países como o Brasil, a participação ainda é marginal, mas há oportunidades de posicionamento como *latecomer* estratégico. Iniciativas como o *Quantum Industrial Innovation* (QuIIN) e projetos de PD&I em Distribuição Quântica de Chaves indicam capacidade de inserção em nichos específicos, especialmente em aplicações industriais e infraestrutura crítica. O desafio é articular políticas industriais e científicas que aproveitem janelas de oportunidade, conectando esforços acadêmicos e empresariais a redes internacionais de cooperação. Essa estratégia pode reduzir barreiras de entrada e ampliar a relevância do país em setores críticos.

Apesar das contribuições, este trabalho apresenta limitações que abrem espaço para pesquisas futuras. A análise concentrou-se em famílias de patentes, privilegiando a dimensão da apropriabilidade, mas não capturou integralmente dinâmicas de publicação científica, transferência de conhecimento ou estratégias empresariais de comercialização. Além disso, é importante reconhecer que patentes não são o único indicador de invenção/ inovação: muitos avanços em tecnologias quânticas são mantidos como segredos industriais ou militares e não aparecem em registros públicos. Pesquisas futuras podem integrar dados de patentes e publicações científicas, realizar comparações entre sistemas nacionais de inovação e explorar aplicações setoriais em energia, defesa, finanças e telecomunicações, aprofundando a

compreensão dos impactos econômicos e sociais da adoção da comunicação quântica.

O estudo evidencia que a comunicação quântica redefine os paradigmas da segurança da informação ao articular criptografia quântica e transmissão fotônica. A consolidação desse campo dependerá da capacidade de transformar conhecimento científico em soluções industriais escaláveis, equilibrando soberania digital e cooperação institucional, em um contexto de crescente competição tecnológica internacional.

Referências

- ABOY, Mateo; MINSEN, Timo; KOP, Mauritz. Mapping the Patent Landscape of Quantum Technologies: Patenting Trends, Innovation and Policy Implications: M. Aboy et al. **IIC-International Review of Intellectual Property and Competition Law**, v. 53, n. 6, p. 853-882, 2022.
- BENNETT, C. H.; BRASSARD, G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. **Theoretical Computer Science**, v. 560, p. 7-11, 2014. (Trabalho original de 1984, republicado).
- CHEN, Shiang-Jiun; TSAI, Yi-Hsueh. Quantum-Safe Networks for 6G: An Integrated Survey on PQC, QKD, and Satellite QKD with Future Perspectives. **Computing & AI Connect**, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2025.
- COCCIA, Mario; ROSHANI, Saeed; MOSLEH, Melika. Morphological evolution of scientific networks in quantum computing, 1990-2020: innovation management implications. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 71, p. 2270-2280, 2024.
- COCCIA, Mario; ROSHANI, Saeed. Path-breaking directions in quantum computing technology: A patent analysis with multiple techniques. **Journal of the Knowledge Economy**, v. 16, n. 1, p. 4991-5024, 2025.
- FERREIRA, Afonso; LIPIÄINEN, Valtteri; POLITO, Carolina. Quantum technologies and cybersecurity. **Centre Eur. Policy Studies, CEPS Papers**, v. 41629, 2023.
- FREEMAN, Christopher. Technology policy and economic performance: Lessons from Japan. **Science Policy Research Unit University of Sussex and Pinter Publishers**, 1987.
- IMRAN, Muhammad et al. Quantum cryptography for future networks security: A systematic review. **IEEE Access**, v. 12, p. 180048-180078, 2024.
- JIANG, Syuan-Yi; CHEN, Shin-Liang. Exploring landscapes of quantum technology with Patent Network Analysis. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 33, n. 11, p. 1317-1331, 2021.
- GISIN, N. et al. **Quantum cryptography**. Reviews of Modern Physics, v. 74, n. 1, p. 145-195, 2002.
- GONÇALVES, Eduardo; FAJARDO, Bernardo de Abreu Guelber. A influência da proximidade tecnológica e geográfica sobre a inovação regional no Brasil. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 15, p. 112-142, 2011.
- GONÇALVES, Eduardo. O padrão espacial da atividade inovadora brasileira: uma análise exploratória. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 37, p. 405-433, 2007.
- GRILICHES, Z. Patent statistics as economic indicators: a survey. **Journal of Economic Literature**, v. 28, n. 4, p. 1661-1707, 1990.
- KONG, Peng-Yong. A review of quantum key distribution protocols in the perspective of smart grid communication security. **IEEE Systems Journal**, v. 16, n. 1, p. 41-54, 2020.
- LO, H.-K.; CURTY, M.; TAMAKI, K. Secure quantum key distribution. **Nature Photonics**, v. 8, n. 8, p. 595-604, 2014.
- LUNDVALL, Bengt-Ake et al. **National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning**. Pinter: London, 1992.
- MALERBA, Franco; ORSENIGO, Luigi. Technological regimes and sectoral patterns of innovative activities. **Industrial and corporate change**, v. 6, n. 1, p. 83-118, 1997.
- MAO, Guozhu et al. Technology status and trends of industrial wastewater treatment: A patent analysis. **Chemosphere**, v. 288, p. 132483, 2022.
- MOTA, Mabel Diz Marques et al. **Dinâmica espacial da atividade tecnológica no Brasil**. 2022. Tese (Doutorado em Economia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2022.

- NELSON, Richard R.; WINTER, Sidney G. **An evolutionary theory of economic change**. Harvard University Press, 1982.
- OECD. **A Quantum Technologies Policy Primer**. Paris: OECD Publishing, 2025a. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/01/a-quantum-technologies-policy-primer_bdac5544/fd1153c3-en.pdf. Acesso em: 30 jan. 2026.
- OECD. **Science, Technology and Innovation Outlook 2025**. Paris: OECD Publishing, 2025b. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/oecd-science-technology-and-innovation-outlook-2025_5fe57b90-en.html. Acesso em 30 jan. 2026.
- PIRANDOLA, Stefano et al. Advances in quantum cryptography. **Advances in optics and photonics**, v. 12, n. 4, p. 1012-1236, 2020.
- POWELL, W. W.; GRODAL, S. **Networks of innovators**. In: FAGERBERG, J.; MOWERY, D. C.; NELSON, R. R. (Eds.). *The Oxford Handbook of Innovation*. Oxford: Oxford University Press, 2005. p. 56-85.
- QURECA. **Quantum Initiatives Worldwide 2025**. 2025. Disponível em: <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/>. Acesso em: 7 fev. 2026.
- RIKAP, Cecilia. **Capitalism, power and innovation: Intellectual monopoly capitalism uncovered**. Routledge, 2021.
- SCARANI, V. et al. The security of practical quantum key distribution. **Reviews of Modern Physics**, v. 81, n. 3, p. 1301-1350, 2009.
- SCHUMPETER, J. A. **Capitalism, socialism and democracy**. New York: Harper & Brothers. 1942.
- YOON, Janghyeok; PARK, Hyunseok; KIM, Kwangsoo. Identifying technological competition trends for R&D planning using dynamic patent maps: SAO-based content analysis. **Scientometrics**, v. 94, n. 1, p. 313-331, 2013.
- ZHONG, Botao et al. Patent cooperative patterns and development trends of Chinese construction enterprises: A network analysis. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 25, n. 3, p. 228-240, 2019.

Anexo 1- Chave de identificação dos depositantes utilizada nas redes de cooperação e coocorrência tecnológica

Universidade	Empresa	Instituição de Pesquisa	Pessoa Física
U1 UNIV NANJING POST & TELECOM	E1 GUANGDONG NAT QUANTUM TECHNOLOGY CO LTD	I1 INDIAN INST TECHNOLOGY MADRAS	P1 SHARMA V
U2 UNIV SOUTH CHINA NORMAL	E2 NANJING RUBAN QUANTUM TECHNOLOGY CO LTD	I2 ELECTRONICS & TELECOM RES INST	P2 EGUCHI M
U3 UNIV NANJING	E3 RUBAN QUANTUM TECHNOLOGY CO LTD	I3 JINAN QUANTUM TECHNOLOGY INST	P3 HAGIWARA M
U4 UNIV BEIJING POST & TELECOM	E4 TOSHIBA KK	I4 CABLE TELEVISION LAB INC	P4 IMAI H
U5 UNIV XIDIAN	E5 ARQIT LTD	I5 INST CATALANA RECERCA & ESTUDIS AVANCATS	P5 LO H
U6 UNIV NORTHWEST	E6 GUANGDONG INCBTEK TECHNOLOGY DEV CO LTD	I6 FUNDACIO INST CIENCIES FOTONQUES	P6 CHAE R
U7 UNIV ARIZONA STATE	E7 NANJING NARI INFORMATION & COMMUNICATION	I7 CHINESE ACAD SCI SEMICONDUCTOR INST	P7 LI L
U8 UNIV SINGAPORE NAT	E8 STATE GRID CORP CHINA	I8 ICREA INST CATALANA RECERCA & ESTUDIS	P8 MA H
U9 UNIV NAT DEFENSE TECHNOLOGY	E9 COGNIZANT TECHNOLOGY SOLUTIONS INDIA PVT	I9 KOREA INST SCI & TECHNOLOGY	P9 BHATNAGAR M
U10 UNIV PLA STRATEGIC SUPPORT FORCE INFORMAT	E10 STATE GRID FUJIAN ELECTRIC POWER CO LTD	I10 ELECTRONICS&TELECOM RES INST	P10 CHAU H F
U11 UNIV XIAN POST & TELECOM	E11 NANJING NARI QUANTUMCTEK TECHNOLOGY CO	I11 DAEGU GYEONGBUK INST SCI & TECHNOLOGY	P11 ARTI M K
U12 UNIV TSINGHUA	E12 QUANTUMCTEK CO LTD	I12 ELECTRIC POWER RES INST STATE GRID ZHEJI	
U13 UNIV CHINA SCI & TECHNOLOGY	E13 MELLANOX TECHNOLOGIES LTD	I13 CHINA ELECTRIC POWER RES INST	
U14 UNIV BROWN	E14 FUZHOU POWER SUPPLY CO STATE GRID FUJIAN	I14 GLOBAL ENERGY INTERCONNECTION RES INST	
U15 UNIV NANYANG TECHNOLOGICAL	E15 STATE GRID FUJIAN ELECTRIC POWER CO	I15 INDIAN INST SCI	
U16 UNIV CAMERINO	E16 STATE GRID INFO-TELECOM GREAT POWER SCI	I16 US SEC OF ARMY	
U17 UNIV KYUNGHEE IND COOP	E17 STATE GRID INFORMATION & TELECOM YILI	I17 CATALANA RECERCA I ESTUDIS AVANCATS INST	
U18 UNIV AIR FORCE ENG CHINESE PEOPLES LIBER	E18 HUAWEI TECHNOLOGIES DUESSELDORF GMBH		
U19 UNIV CHONGQING TECHNOLOGY	E19 CRIPTOCAM SRL		
U20 UNIV CHONGQING POSTS & TELECOM	E20 CHINA INFORMATION TECHNOLOGY DESIGNING &		
U21 UNIV CYBERSPACE FORCE INFORMATION ENG	E21 BEIJING ZHONGKE GUOQUANG QUANTUM TECHNOLOGY CO LTD		
U22 UNIV CENT SOUTH FORESTRY & TECHNOLOGY	E22 CHONGQING ELECTRIC POWER CORP INFORMATIO		
U23 UNIV HEFEI TECHNOLOGY	E23 NARI GROUP CORP		
U24 UNIV GUANGXI	E24 ZHEJIANG SHENZHOU QUANTUM NETWORK TECHNO		
U25 UNIV HUNAN	E25 QULABZ INC		
U26 UNIV ZHENGZHOU LIGHT IND	E26 TOSHIBA CORP		
U27 UNIV NORTHEAST PETROLEUM	E27 STATE GRID FUJIAN FUZHOU ELECTRIC POWER		
U28 UNIV CHINESE PEOPLES LIBERATION ARMY AIR	E28 MITRE CORP		
U29 UNIV CHINESE PLA AIR FORCE ENG	E29 NXGEN PARTNERS IP LLC		
U30 UNIV SHAANXI NORMAL	E30 SONY CORP		
U31 UNIV ANQING NORMAL	E31 FOUND PROMOTION IND SCI		
U32 UNIV XIZANG MINZU	E32 ZH SEISAN GIJUTSU KENKYU SHOREIKAI		
U33 UNIV CHINA THREE GORGES	E33 BRANDT H E		
U34 UNIV ANHUI	E34 GENERAL ELECTRIC CO		
U35 UNIV PLA ARMY ENG	E35 NEUROCRYPTONICS INNOVATIONS LLC		
U36 UNIV NORTH CHINA ELECTRIC POWER	E36 TERRA QUANTUM AG		
U37 UNIV CHENGDU INFORMATION TECHNOLOGY	E37 TOSHIBA RES EURO LTD		
U38 UNIV SOUTHWEST	E38 INMARSAT GLOBAL LTD		
U39 UNIV CHANDIGARH	E39 GUANGDONG INCUBATOR TECHNOLOGY DEV CO		
U40 UNIV PUTRA MALAYSIA	E40 ANHUI QASKY QUANTUM TECHNOLOGY CO LTD		
U41 CHINESE ACAD SCI POSTGRADUATE SCHOOL	E41 BEIJING MONISTAR TECHNOLOGY CO LTD		
U42 CMR ENG & TECHNOLOGY COLLEGE	E42 BEIJING ACAD QUANTUM INFORMATION SCI		
U43 DHANALAKSHMI SRINIVASAN ENG COLLEGE	E43 CHINA SOUTHERN POWER GRID CO LTD EXTRA		
U44 ANNAPOORANA ENG COLLEGE	E44 STATE GRID INFORMATION & TELECOM GROUP		
U45 POTTI SRIRAMULU CHALAVADI MALLIKARJUNA	E45 STATE GRID ZHEJIANG ELECTRIC POWER CO		
	E46 ANHUI JIYUAN SOFTWARE CO LTD		
	E47 JIAXING NANHU GUOXIN DIGITAL ECONOMY INN		
	E48 SHANDONG COMPUTER SCI CENT		
	E49 GUIZHOU POWER GRID CO LTD		
	E50 CHINA NAT PETROLEUM CORP		
	E51 CHINA PETROLEUM PIPELINE ENG CORP		
	E52 SHANDONG INSPUR SCI & TECHNOLOGY ACAD CO		
	E53 STARMINE TECHNOLOGY BEIJING CO LTD		
	E55 INFORMATION & COMMUNICATION BRANCH STATE		
	E56 GUANGZHOU ZHEXUN INTELLIGENT TECHNOLOGY		
	E57 BEIJING ANZHENG TONG INFORMATION TECHNOLO		
	E58 BEIJING DONGFANG SENTAI TECHNOLOGY DEV		
	E59 INFORMATION COMMUNICATION CO SHANDONG		
	E60 ACAD MILITARY SCI NETWORK INFORMATION		
	E61 STATE GRID ANHUI ELECTRIC POWER CO LTD		
	E62 STATE GRID SICHUAN ELECTRIC POWER CO ELE		

Fonte: Elaboração dos autores a partir do Derwent Innovations Index