
Internet Quântica: Uma Análise da Evolução do Conhecimento Científico

Moniele Silva Sousa



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Moniele Silva Sousa

Internet Quântica: Uma Análise da Evolução do Conhecimento Científico

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Computação da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de concentração: Ciência da Computação

Orientador: João Henrique de Souza Pereira

Coorientadores: Alex Fabianne de Paulo

Bruno Augusto Nassif Travençolo

Uberlândia

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S725 2026	Sousa, Moniele Silva, 1992- Internet Quântica: Uma Análise da Evolução do Conhecimento Científico [recurso eletrônico] / Moniele Silva Sousa. - 2026. Orientador: João Henrique de Souza Pereira. Coorientador: Alex Fabianne de Paulo. Coorientador: Bruno Augusto Nassif Tranvençolo. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Ciência da Computação. Modo de acesso: Internet. DOI http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.662 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações. 1. Computação. I. Pereira, João Henrique de Souza,1975-, (Orient.). II. Paulo, Alex Fabianne de,1978-, (Coorient.). III. Tranvençolo, Bruno Augusto Nassif,1981-, (Coorient.). IV. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Ciência da Computação. V. Título. CDU: 681.3
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Ciência da Computação				
Defesa de:	Dissertação, 31/2026, PPGCO				
Data:	25 de Agosto de 2026	Hora de início:	19:00	Hora de encerramento:	21:51
Matrícula do Discente:	12312CCP023				
Nome do Discente:	Moniele Silva Sousa				
Título do Trabalho:	Internet Quântica: Uma Análise da Evolução do Conhecimento Científico.				
Área de concentração:	Ciência da Computação				
Linha de pesquisa:	Sistemas de Computação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	-----				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, assim composta: Professores Doutores: Alex Fabianne de Paulo - UFG (Coorientador), Bruno Augusto Nassif Travençolo - FACOM/UFU(Coorientador), Luís Fernando Faina - FACOM/UFU, Alexandre Aparecido Dias - FEARP-USP e João Henrique de Souza Pereira - FACOM/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Os examinadores participaram desde as seguintes localidades: Bruno Augusto Nassif Travençolo - Rio de Janeiro/RJ, Alexandre Aparecido Dias - Ribeirão Preto/SP. Os outros membros da banca e o aluno(a) participaram da cidade de Uberlândia.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Prof. Dr. João Henrique de Souza Pereira, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao(à) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos,

conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Augusto Nassif Travençolo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/09/2026, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alex Fabianne de Paulo, Usuário Externo**, em 08/09/2026, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Aparecido Dias, Usuário Externo**, em 09/09/2026, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Henrique de Souza Pereira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 17/09/2026, às 20:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luís Fernando Faina, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/09/2026, às 07:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7612162** e o código CRC **D21CE611**.

*Dedico este trabalho a todos que acreditaram em mim ao longo desta caminhada.
Que esta conquista seja a prova de que a perseverança sempre encontra um caminho.*

Agradecimentos

Nesses anos de mestrado, de muito esforço e empenho, gostaria de agradecer algumas pessoas que me acompanharam e foram essenciais para a realização deste sonho. Por isso, expresso aqui, um pouquinho da importância que elas tiveram, e ainda têm, nesta conquista e a minha sincera gratidão a todas elas.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para concluir esta etapa tão importante da minha vida.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio constante, pelos valores dos estudos, da honestidade e por nunca deixarem de acreditar em mim. À minha irmã, pela presença, incentivo e carinho ao longo dessa caminhada.

Aos meus filhos gêmeos, que transformaram minha vida e deram um novo significado à palavra propósito. Cada desafio enfrentado tornou esta conquista ainda mais especial por causa de vocês.

Aos meus orientadores, pela confiança depositada em mim desde o início desta jornada. Mesmo diante das interrupções e dos desafios que marcaram esses últimos anos de percurso, acreditaram no meu potencial e me incentivaram a seguir em frente. Sou profundamente grata pela orientação, paciência e apoio.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho, agora concluído após uma longa trajetória de aprendizados e persistência, se tornasse realidade.

Resumo

A Internet Quântica tem sido reconhecida como uma das principais tecnologias em desenvolvimento para a próxima geração das redes de comunicação, ao explorar propriedades da mecânica quântica, como a superposição e o emaranhamento, para possibilitar novos modelos de comunicação, segurança e computação distribuída. Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo caracterizar a evolução da Internet Quântica por meio da análise do conhecimento científico, ao longo do tempo. Para isso, foram analisados artigos indexados nas bases *Web of Science* e *Scopus*. Essa base foi utilizada para caracterizar o conhecimento científico da área por meio de estatísticas descritivas e investigar a evolução do conhecimento a partir da análise da rede de citações, e da identificação da rota de conhecimento. Os resultados mostraram um aumento no conhecimento científico sobre o tema, concentrada principalmente em periódicos de grande influência e em grupos de pesquisa localizados na China, Europa e Estados Unidos. A rota de conhecimento possibilitou analisar a evolução científica da Internet Quântica em três camadas distintas: basilar, intermediária e emergente. Observou-se uma transição dos estudos voltados a teoria da comunicação quântica para pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de arquiteturas, protocolos, redes experimentais e aplicações distribuídas. Conclui-se que a Internet Quântica se estabeleceu como um campo de rápido crescimento, com avanços que demonstraram amadurecimento em pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de Redes Quânticas em larga escala.

Palavras-chave: Internet Quântica. Redes Quânticas. Redes de Citação. Rota de Conhecimento.

Abstract

The Quantum Internet has been recognized as one of the key technologies under development for the next generation of communication networks, as it exploits properties of quantum mechanics—such as superposition and entanglement—to enable new models of communication, security, and distributed computing. In this context, this dissertation aims to characterize the evolution of the Quantum Internet through an analysis of scientific knowledge over time. To this end, articles indexed in the Web of Science and Scopus databases were analyzed. This dataset was used to characterize scientific knowledge in the field through descriptive statistics and to investigate the evolution of knowledge based on citation network analysis and the identification of knowledge pathways. The results showed an increase in scientific knowledge on the topic, concentrated primarily in highly influential journals and in research groups located in China, Europe, and the United States. The knowledge pathway made it possible to analyze the scientific evolution of the Quantum Internet across three distinct layers: foundational, intermediate, and emerging. A transition was observed from studies focused on quantum communication theory to research directed toward the development of architectures, protocols, experimental networks, and distributed applications. It is concluded that the Quantum Internet has established itself as a rapidly growing field, with advances demonstrating maturity in research related to the development of large-scale quantum networks.

Keywords: Quantum Internet. Quantum Networks. Citation Network. Knowledge Path..

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução das Redes Móveis	26
Figura 2 – Representação de um qubit na esfera de Bloch	29
Figura 3 – Aplicações de uma Internet Quântica	32
Figura 4 – Arquitetura de uma Internet Quântica	33
Figura 5 – Etapas Metodológicas	45
Figura 6 – Evolução temporal das publicações.	51
Figura 7 – Participação dos 10 países que mais publicaram.	54
Figura 8 – Top 10 autores segundo número de publicações anualmente	55
Figura 9 – Top 20 periódicos segundo o número de publicações.	57
Figura 10 – Rede de Citação	58
Figura 11 – Rota Conhecimento	59

Lista de tabelas

Tabela 1 – Diferenças entre Internet Atual e Internet Quântica	31
Tabela 2 – Divisão dos Arquivos utilizados	47
Tabela 3 – Estatísticas de rede utilizadas e seus conceitos	49
Tabela 4 – Caracterização geral da base de dados	51
Tabela 5 – Vinte trabalhos mais influentes	52
Tabela 6 – Top 20 países agrupados por continente	53
Tabela 7 – Top 20 periódicos de publicação	56
Tabela 8 – Artigos pertencentes a Camada Basilar	61
Tabela 9 – Artigos pertencentes a Camada Intermediária	67
Tabela 10 – Artigos pertencentes à Camada Emergente	77
Tabela 11 – Comparação entre as camadas da rota principal de conhecimento científico	79

Lista de siglas

ARS Análise de Redes Sociais

ARPA Advanced Research Projects Agency

DAG Directed Acyclic Graph

DOI Digital Object Identifier System

EDGE Enhanced Data Rates for GSM Evolution

GPRS General Packet Radio Service

GSM Global System for Mobile Communications

HSPA High-Speed Packet Access

IoT Internet das Coisas

KDD Knowledge Discovery in Databases

LTE Long Term Evolution

MassiveMIMO Massive Multiple Input Multiple Output

MPA Main Path Analysis

NCP Network Control Protocol

NISQ Noisy Intermediate-Scale Quantum

QKD Quantum Key Distribution

SMS Short Message Service

SNA Social Network Analysis

SPC Search Path Count

SPLC Search Path Link Count

SPLC-DP Search Path Link Count - Dynamic Programming

SPNP Search Path Node Pair

UMTS Universal Mobile Telecommunications System

WCDMA Wideband Code Division Multiple Access

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação	21
1.2	Objetivos e Desafios da Pesquisa	22
1.3	Hipótese	23
1.4	Contribuições	23
1.5	Organização da Dissertação	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Revisão de Literatura	25
2.1.1	Evolução das Tecnologias de Comunicação	25
2.1.2	Computação Quântica	27
2.1.3	Internet Quântica	30
2.1.4	Prospecção do Conhecimento	34
2.2	Trabalhos Correlatos	36
3	MÉTODO DE PESQUISA	41
3.1	Caracterização da Pesquisa	41
3.2	Procedimentos Metodológicos	42
3.2.1	Análise Estatística Descritiva	42
3.2.2	Identificação das Rotas de Conhecimento	42
3.3	Consolidação dos Resultados	44
4	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
4.1	Método para a Avaliação	45
4.1.1	Seleção e extração dos dados	46
4.1.2	Tratamento e Padronização dos Dados	46
4.1.3	Estruturação dos dados para análise	48
4.1.4	Criação dos modelos de visualização	48

4.1.5	Análise e Interpretação dos dados	49
4.2	Experimentos	50
4.2.1	Análise descritiva da Conhecimento Científico sobre Internet Quântica e Redes Quânticas	50
4.2.2	Análise da Rede de Citação	57
4.2.3	Análise da Rota de Conhecimento	58
5	CONCLUSÃO	81
5.1	Principais Contribuições	82
5.2	Trabalhos Futuros	83
5.3	Contribuições em Produção Bibliográfica	84
	REFERÊNCIAS	85

Introdução

A Internet transformou a sociedade desde a criação da primeira rede mundial de computadores, a *ARPANET*, desenvolvida na década de 1960 com o objetivo inicial de permitir a comunicação entre centros de pesquisa e instituições militares dos Estados Unidos (MARILL; ROBERTS, 1966). Ao longo das últimas décadas, a evolução das tecnologias de comunicação impulsionou o crescimento da Internet em escala global, consolidando-a como uma das principais infraestruturas tecnológicas da sociedade (LEINER; CERF; CLARK, 2009). Esse crescimento foi acompanhado por avanços contínuos na capacidade computacional e na miniaturização de hardware, impulsionados pela evolução dos semicondutores e pelo aumento do poder de processamento (MOORE, 2006).

A expansão da Internet possibilitou avanços significativos na forma como indivíduos, empresas e governos se comunicam e compartilham informações. O desenvolvimento de aplicações multimídia, serviços em nuvem, redes sociais, comércio eletrônico e sistemas distribuídos ampliou a dependência da sociedade em relação às redes de comunicação digitais (ARSHAD et al., 2019). Paralelamente, a crescente demanda por velocidade, capacidade de processamento, segurança e confiabilidade evidenciou limitações estruturais da arquitetura clássica da Internet, discutidas desde a década de 1990 por pesquisadores da área de redes de computadores (CLARK et al., 1991).

Entre os principais desafios enfrentados pela Internet atual destacam-se questões relacionadas à segurança da informação, escalabilidade, gerenciamento de tráfego, latência e confiabilidade das comunicações. Com o aumento exponencial do volume de dados transmitidos e do número de dispositivos conectados, tornou-se necessário investigar novos modelos computacionais capazes de superar os obstáculos das tecnologias clássicas. Nesse contexto, a computação quântica surgiu como uma alternativa promissora ao explorar propriedades até então não vistas, como superposição e emaranhamento, para realizar tarefas computacionais de maneira potencialmente mais eficiente que os computadores clássicos (FEYNMAN, 1982).

Nos últimos anos, o avanço das pesquisas em Redes Quânticas, distribuição de emaranhamento e repetidores quânticos tem acelerado o desenvolvimento da Internet Quântica,

considerada uma das principais perspectivas para a próxima geração de comunicações seguras e computação distribuída (CALEFFI; CACCIAPUOTI; BIANCHI, 2018; KUMAR et al., 2025b). Diferentemente da Internet clássica, baseada na transmissão de *bits* que assumem valores binários de 0 ou 1, a Internet Quântica utiliza *qubits*, que podem representar múltiplos estados simultaneamente devido ao princípio da superposição quântica (KIMBLE, 2008). Além disso, fenômenos como o emaranhamento quântico possibilitam novas formas de comunicação e segurança, incluindo protocolos de distribuição de chaves quânticas e teletransporte quântico. Além disso, pesquisas iniciais já apontavam o potencial de Redes Quânticas para viabilizar comunicação e teletransporte quântico entre computadores distribuídos (LLOYD et al., 2004). E estudos recentes afirmam essa teoria, pois têm investigado mecanismos de controle e roteamento em Redes Quânticas multi-hop, visando viabilizar aplicações como computação distribuída quântica e distribuição de chaves quânticas em larga escala (VALLS; PROMPONAS; TASSIULAS, 2024).

Além dos avanços experimentais, pesquisas recentes têm direcionado esforços para a definição de arquiteturas, protocolos e mecanismos de roteamento especificamente projetados para Redes Quânticas. Estudos recentes discutem novas formas de endereçamento quântico, pilhas de protocolos nativas para comunicação quântica e arquiteturas capazes de integrar dispositivos heterogêneos, evidenciando a transição da Internet Quântica de uma proposta conceitual para uma infraestrutura de comunicação em desenvolvimento (CALEFFI; CACCIAPUOTI, 2026; CACCIAPUOTI; CALEFFI, 2026).

Experimentos ao longo da história quântica demonstraram avanços significativos rumo à construção de Redes Quânticas em larga escala. Entre esses avanços, destacam-se os primeiros processadores quânticos com dezenas de *qubits* desenvolvidos por grandes empresas de tecnologia, evidenciando a rápida evolução da capacidade computacional quântica experimental (CASTELVECCHI, 2017). Em 2019, o processador quântico *Sycamore*, desenvolvido pelo Google, foi utilizado em um experimento que reivindicou a chamada supremacia quântica ao executar uma tarefa específica em tempo inferior ao estimado para supercomputadores clássicos (ARUTE et al., 2019). Paralelamente, diferentes países e organizações passaram a investir fortemente em tecnologias quânticas. A União Europeia, por exemplo, lançou iniciativas de grande escala voltadas ao desenvolvimento de tecnologias quânticas, destinando investimentos bilionários para pesquisas na área (GIBNEY, 2017). A União Europeia, por exemplo, lançou em 2018 o programa *Quantum Flagship*, destinado ao financiamento de pesquisas em comunicação e computação quântica. Da mesma forma, a China realizou experimentos pioneiros de comunicação quântica via satélite *Micius*, alcançando transmissões quânticas em distâncias superiores a mil quilômetros (LIAO et al., 2017). Um estudo recente demonstrou a transmissão de emaranhamento quântico em área urbana utilizando fibras ópticas convencionais, aproximando a troca de informação em estado quântico (CASTELVECCHI, 2024).

Além dos avanços experimentais, pesquisas recentes têm concentrado esforços no de-

envolvimento de repetidores quânticos, protocolos de distribuição de emaranhamento e arquiteturas de Redes Quânticas capazes de viabilizar a futura Internet Quântica. Estudos apontam que essa nova infraestrutura poderá proporcionar elevados níveis de segurança nas comunicações, aumento da capacidade computacional e novas aplicações em áreas como criptografia e inteligência artificial (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018).

Esse crescente interesse por tecnologias quânticas também pode ser observado pelo aumento de iniciativas colaborativas entre universidades, centros de pesquisa e empresas de tecnologia (KUMAR et al., 2025b). Entretanto, apesar dos avanços observados, a Internet Quântica ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento, apresentando diversos desafios técnicos, econômicos e estruturais. Podemos destacar o desenvolvimento de repetidores quânticos eficientes, fundamentais para permitir a distribuição de emaranhamento em Redes Quânticas de longa distância (YOSHIDA; HORIKIRI, 2024). Dessa forma, compreender a evolução das pesquisas em Internet Quântica torna-se essencial para identificar tendências tecnológicas, lacunas científicas e potenciais impactos dessa nova geração de redes.

Nesse contexto, este trabalho propõe caracterizar a evolução da Internet Quântica a partir da análise de rotas de conhecimento, identificando os principais avanços científicos e tecnológicos relacionados à área. Além disso, busca-se analisar os possíveis impactos dessa futura infraestrutura no contexto da ciência da computação, especialmente em relação ao desenvolvimento tecnológico, à formação profissional e às perspectivas futuras de pesquisa e inovação.

1.1 Motivação

A motivação desta dissertação está relacionada ao crescente avanço das pesquisas em Internet Quântica e aos impactos que essa tecnologia poderá provocar nas áreas de comunicação, computação e segurança da informação nos próximos anos. O desenvolvimento recente de computadores quânticos, protocolos de comunicação quântica e Redes Quânticas experimentais demonstra que a evolução da Internet caminha para um novo modelo tecnológico (KIMBLE, 2008; WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018).

Desde a criação da *ARPANET*, a Internet passou por diversas transformações e tornou-se essencial para atividades econômicas, científicas e sociais. Entretanto, o aumento contínuo da demanda por desempenho computacional, segurança e capacidade de transmissão de dados evidencia limitações das arquiteturas clássicas atuais. Nesse cenário, a Internet Quântica surge como uma proposta capaz de oferecer novas técnicas de comunicação e processamento, explorando propriedades quânticas como superposição e emaranhamento (CLARK et al., 1991; CUOMO et al., 2020).

Nos últimos anos, o interesse acadêmico e industrial nessa área cresceu significativamente, impulsionado por avanços em computação quântica. Grandes empresas de tec-

nologia e centros de pesquisa têm investido no desenvolvimento de sistemas quânticos, fortalecendo o desejo e visão de implementação de Redes Quânticas em larga escala (PI-RANDOLA et al., 2020; AWSCHALOM et al., 2021).

Outro aspecto relevante refere-se à segurança da informação. Atualmente, grande parte dos mecanismos criptográficos utilizados na Internet clássica depende de problemas matemáticos considerados computacionalmente difíceis para computadores convencionais. Entretanto, o avanço da computação quântica poderá comprometer parte desses mecanismos de criptografia, tornando necessária a investigação de novas abordagens de segurança. Nesse contexto, a Internet Quântica apresenta-se como uma alternativa promissora ao possibilitar protocolos de comunicação com elevados níveis de segurança (GISIN et al., 2002; BENNETT; BRASSARD, 2014).

A pesquisa também se justifica pelos avanços observados na computação quântica nos últimos anos. Experimentos relacionados à supremacia quântica demonstraram a capacidade de processadores quânticos executarem tarefas específicas em tempo significativamente inferior ao de computadores clássicos. Um dos principais marcos foi o desenvolvimento do processador quântico *Sycamore*, que evidenciou a viabilidade da execução de tarefas computacionais em escalas inviáveis para sistemas clássicos (ARUTE et al., 2019). Esses avanços reforçam a necessidade de compreender como futuras Redes Quânticas poderão integrar sistemas computacionais, serviços distribuídos e aplicações emergentes.

Dessa forma, compreender a evolução da Internet Quântica, seus desafios tecnológicos e seus possíveis impactos científicos torna-se fundamental para caracterizar o tema. Nesse sentido, este trabalho propõe contribuir para a ampliação do conhecimento sobre Internet Quântica e para o fortalecimento das discussões relacionadas ao desenvolvimento da próxima geração da Internet.

1.2 Objetivos e Desafios da Pesquisa

O objetivo deste trabalho é caracterizar a evolução da Internet Quântica por meio do mapeamento das rotas dos estudos científicos, bem como identificar as pesquisas mais emergentes nesta área de conhecimento. Para a condução da pesquisa e como forma de atingir o objetivo geral, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- ❑ Mapear uma base de conhecimentos científicos (artigos) sobre Internet Quântica;
- ❑ Caracterizar a Internet Quântica a partir de uma análise das estatísticas descritivas da base de conhecimentos científico;
- ❑ Analisar a evolução da Internet Quântica por meio de rota de conhecimento;

1.3 Hipótese

Acredita-se que a caracterização da Internet Quântica, somada ao mapeamento da sua evolução científica, será possível analisar a evolução da Internet Quântica.

1.4 Contribuições

As principais contribuições do presente trabalho são:

- ❑ Uma análise do estado da arte dos estudos científicos acerca da Internet Quântica;
- ❑ Caracterização de tais estudos e como se dará a evolução do tema;
- ❑ Uma análise dos impactos da Internet Quântica na área de tecnologia e sociedade;

1.5 Organização da Dissertação

O desenvolvimento desta pesquisa será versado em cinco capítulos, da seguinte forma: o capítulo 1 será a introdução que busca contextualizar o tema proposto, identificar a lacuna teórica e, assim, apresentar o problema de pesquisa, os objetivos, motivação e contribuições originais, além da estrutura do texto. O capítulo 2 trará uma revisão da bibliografia sobre tecnologias correlatas, computação quântica e Internet Quântica, base para este estudo. O capítulo 3 descreve o método utilizado, em detalhes. No capítulo 4 será apresentada a análise dos resultados e no capítulo 5 as conclusões, contribuições, limitações e trabalhos futuros.

Fundamentação Teórica

Ao longo deste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica para a compreensão do trabalho e seus objetivos.

2.1 Revisão de Literatura

2.1.1 Evolução das Tecnologias de Comunicação

A evolução das tecnologias de comunicação está diretamente associada ao desenvolvimento da Internet e das redes móveis sem fio. As origens da Internet remontam ao contexto da guerra fria, período em que os Estados Unidos intensificaram investimentos em pesquisas voltadas à criação de sistemas de comunicação distribuídos (ABBATE, 2000). Nesse cenário, a *Advanced Research Projects Agency (ARPA)* foi criada com o objetivo de promover pesquisas estratégicas em ciência e tecnologia, resultando no desenvolvimento da *ARPANET*, considerada a pioneira da Internet moderna (NORBERG; O'NEILL, 2000).

Em 1969 ocorreu a primeira comunicação entre computadores conectados à *ARPANET*, estabelecendo um marco histórico para as redes de computadores. Inicialmente, a comunicação era realizada por meio do protocolo *Network Control Protocol (NCP)*, porém o crescimento da rede evidenciou limitações relacionadas à interoperabilidade e escalabilidade. Como consequência, foi proposto em 1974, o modelo TCP/IP, modelo de referência de arquitetura da Internet (CERF; KAHN, 1974).

A consolidação da Internet impulsionou o avanço das telecomunicações e favoreceu o desenvolvimento das redes móveis celulares. A evolução dessas redes passou a ser organizada em gerações tecnológicas, cada uma projetada para atender às crescentes demandas de conectividade, capacidade de transmissão, mobilidade e qualidade de serviço, conforme mostra a Figura 1.

A primeira geração de redes móveis (1G), introduzida comercialmente na década de 1980, utilizava sistemas analógicos voltados exclusivamente à comunicação de voz. Em-



Figura 1 – Evolução das Redes Móveis

bora tenha representado um avanço significativo para a mobilidade, apresentava limitações relacionadas à baixa capacidade, reduzida eficiência espectral e ausência de mecanismos robustos de segurança (SANTHI et al., 2003; RAPPAPORT et al., 2019).

Na década de 1990 surgiu a segunda geração (2G), caracterizada pela digitalização das comunicações móveis. O padrão *Global System for Mobile Communications (GSM)* consolidou-se mundialmente e introduziu melhorias significativas na qualidade das chamadas, eficiência e segurança da comunicação. Além disso, o 2G permitiu o surgimento de serviços como o *Short Message Service (SMS)* e o acesso inicial à Internet móvel por meio de tecnologias como *General Packet Radio Service (GPRS)* e *Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE)* (HALONEN; ROMERO; MELERO, 2004; DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2021).

A terceira geração (3G), implantada no início dos anos 2000, foi desenvolvida com o objetivo de fornecer acesso móvel à Internet em banda larga. Tecnologias como *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, *Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)* e *High-Speed Packet Access (HSPA)* possibilitaram maiores taxas de transmissão, suporte a aplicações multimídia e expansão dos serviços móveis de dados (DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2021). Essa geração representou um marco importante para a difusão dos smartphones e para a consolidação da conectividade móvel em larga escala.

Posteriormente, a quarta geração (4G), baseada principalmente no padrão *Long Term Evolution (LTE)*, promoveu uma transformação significativa ao introduzir uma arquitetura totalmente orientada a protocolos IP. O 4G proporcionou elevadas taxas de transmissão, baixa latência e maior eficiência, possibilitando aplicações de *streaming* em alta definição, computação em nuvem, redes sociais móveis e comunicação multimídia em tempo real (JI; PARK, 2024). Além disso, o crescimento exponencial do tráfego de dados móveis e da quantidade de dispositivos conectados impulsionou a necessidade de infraestruturas mais flexíveis e escaláveis.

Nesse contexto surgiu a quinta geração de redes móveis (5G), considerada uma evolução disruptiva em relação às gerações anteriores. Diferentemente do 4G, o 5G foi con-

cebido não apenas para ampliar a velocidade de transmissão, mas também para suportar aplicações com requisitos rigorosos de latência, confiabilidade e conectividade massiva (SHAFI et al., 2024). Entre suas principais características destacam-se o uso de *Massive Multiple Input Multiple Output (MassiveMIMO)*, *Beamforming*, frequências milimétricas (*mmWave*), virtualização de funções de rede e *Network Slicing* (SAAD; BENNIS; CHEN, 2020).

O 5G tornou-se uma infraestrutura estratégica para aplicações emergentes, incluindo Internet das Coisas (IoT), veículos autônomos, automação industrial, telemedicina, cidades inteligentes e realidade estendida. Além disso, a integração entre inteligência artificial, computação em borda (*Edge Computing*) e redes móveis vem permitindo o desenvolvimento de sistemas mais autônomos, inteligentes e adaptativos (STRINATI et al., 2023).

Mesmo com a consolidação gradual do 5G em diversos países, pesquisas relacionadas à sexta geração de redes móveis (6G) já vêm sendo intensificadas. O 6G é concebido como uma infraestrutura orientada à integração entre inteligência artificial nativa da rede, comunicação holográfica, sensoriamento integrado, computação ubíqua e comunicação quântica (TATARIA et al., 2021). Espera-se que as futuras redes 6G utilizem frequências terahertz (THz), possibilitando velocidades na ordem de terabits por segundo, latência extremamente reduzida e suporte a aplicações imersivas avançadas (AKYILDIZ; KAK; NIE, 2022).

Além disso, a evolução das redes móveis demonstra que o avanço tecnológico não está restrito apenas ao aumento das taxas de transmissão de dados, mas também à transformação estrutural da infraestrutura global de comunicação. A crescente complexidade das aplicações modernas, associada às limitações físicas das arquiteturas clássicas, impulsiona pesquisas em novos modelos computacionais e de comunicação, entre eles as Redes Quânticas e a Internet Quântica. Nesse cenário, diferentes autores defendem que a integração entre redes 6G e tecnologias de comunicação quântica poderá constituir uma das principais infraestruturas para serviços críticos das futuras redes globais, especialmente em aplicações que demandam elevados níveis de segurança (MAHAPATRA et al., 2026).

2.1.2 Computação Quântica

A computação quântica consiste em um padrão computacional com fundamentos nos princípios da mecânica quântica, utilizando fenômenos como superposição, emaranhamento e interferência para representar e processar informações (NIELSEN; CHUANG, 2010; LADD et al., 2010). Diferentemente dos computadores clássicos, que processam dados por meio de *bits* (que assumem apenas dois estados, 0 e 1), os computadores quânticos utilizam *qubits* (*quantum bits*), capazes de assumir simultaneamente múltiplos estados quânticos. Essa característica permite explorar propriedades físicas inexistentes na computação clássica, oferecendo potencial computacional consideravelmente superior para determinados problemas (RIETSCHE et al., 2022).

Nas últimas décadas, o avanço da computação clássica foi sustentado principalmente pela redução do tamanho dos transistores e pelo aumento da capacidade de processamento dos circuitos integrados. Entretanto, à medida que os dispositivos eletrônicos se aproximam de limites físicos em escala atômica, tornam-se evidentes as restrições do modelo clássico para aplicações que demandam elevada capacidade computacional (NOFER et al., 2023). Nesse contexto, a computação quântica é vista como uma alternativa para o desenvolvimento de novas arquiteturas computacionais capazes de resolver problemas que antes eram considerados intratáveis para sistemas convencionais (GILL; BUYYA, 2024).

O surgimento da computação quântica está associado às contribuições teóricas desenvolvidas no início da década de 1980. Paul Benioff propôs um modelo teórico de Máquina de *Turing* baseado em princípios quânticos, enquanto Richard Feynman observou que sistemas quânticos complexos não poderiam ser simulados eficientemente por computadores clássicos devido ao crescimento exponencial da complexidade computacional (UPAMA et al., 2022; NOFER et al., 2023). Segundo Feynman, a única forma eficiente de simular sistemas quânticos seria por meio de dispositivos que também operassem segundo as leis da mecânica quântica (RIETSCHE et al., 2022).

Um dos principais marcos históricos da computação quântica ocorreu em 1994, com a proposição do algoritmo de fatoração de *Shor*, considerado um dos resultados mais relevantes da ciência da informação quântica (SHOR, 1999). O algoritmo demonstrou teoricamente que um computador quântico suficientemente robusto poderia fatorar grandes números inteiros exponencialmente mais rapidamente que os melhores algoritmos clássicos conhecidos, comprometendo diretamente sistemas de criptografia utilizados, como o RSA (NIELSEN; CHUANG, 2010). Esse resultado impulsionou o desenvolvimento da área, consolidando a computação quântica como um campo estratégico de pesquisa científica e tecnológica (PRESKILL, 2018).

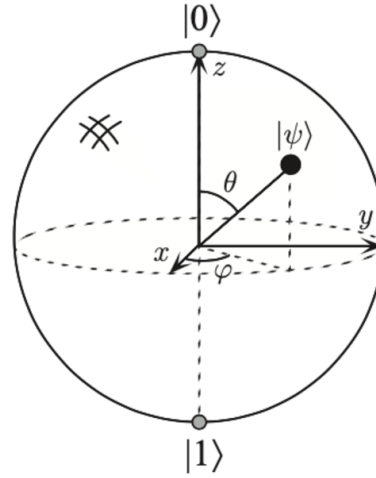
Do ponto de vista arquitetural, computadores quânticos possuem elementos funcionalmente semelhantes aos sistemas clássicos, como registradores, unidades de processamento e memórias. Entretanto, suas implementações físicas divergem, uma vez que as informações são armazenadas e manipuladas por meio de estados quânticos (METER; DEVITT, 2016). Nessas arquiteturas, as operações computacionais são aplicadas sobre registradores quânticos compostos por *qubits*.

Diferentemente do *bit* clássico, que assume exclusivamente os estados 0 ou 1, o *qubit* pode existir ao mesmo tempo em uma combinação linear desses estados por meio da superposição quântica (NIELSEN; CHUANG, 2010).

Na representação geométrica da esfera de Bloch (Figura 2), o estado de um *qubit* também pode ser descrito pelos ângulos θ e ϕ , sendo θ responsável pela posição entre os estados base 0 e 1, enquanto ϕ representa a fase relativa entre esses estados, desempenhando papel fundamental nos fenômenos de interferência quântica (NIELSEN; CHUANG, 2010).

Além da superposição, outro fenômeno essencial para a computação quântica é o ema-

Figura 2 – Representação de um qubit na esfera de Bloch



Fonte: Adaptado de (NIELSEN; CHUANG, 2010)

ranhamento quântico, no qual o estado de um sistema quântico torna-se diretamente dependente do estado de outro sistema relacionado (IMRE; GYONGYOSI, 2012). Essa característica possibilita correlações impossíveis de serem reproduzidas nos sistemas clássicos e constitui um dos principais recursos explorados pelos algoritmos quânticos. Associados a esses efeitos, destacam-se ainda princípios fundamentais como a interferência quântica, a decoerência e o teorema da não clonagem, segundo o qual estados quânticos desconhecidos não podem ser copiados perfeitamente (METER; DEVITT, 2016). Tais propriedades tornam os sistemas quânticos muito sensíveis à interferência externa, representando um dos principais desafios para a construção de computadores quânticos escaláveis e estáveis (BARRAL et al., 2025b).

Na camada física, diferentes tecnologias vêm sendo investigadas para a implementação de *qubits*, incluindo circuitos supercondutores, íons aprisionados, pontos quânticos, spins eletrônicos e sistemas fotônicos (LADD et al., 2010). Nos últimos anos, avanços experimentais permitiram o desenvolvimento de dispositivos classificados como *Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)*, caracterizados pela presença de ruído e limitações relacionadas à correção de erros (PRESKILL, 2018). Apesar dessas restrições, esses sistemas já possibilitam experimentos práticos e validações iniciais de algoritmos quânticos em aplicações científicas e industriais.

A computação quântica também está diretamente associada ao conceito de computação reversível, no qual o estado inicial de um sistema pode ser recuperado a partir de seu estado final (BENNETT, 1973). Em circuitos quânticos, essa propriedade é garantida pela aplicação de operações unitárias reversíveis implementadas por meio de portas lógicas quânticas. Dessa forma, os estados quânticos evoluem de maneira definida até o instante da medição, até que o sistema assume um estado clássico mensurável (NIELSEN;

CHUANG, 2010).

A manipulação física dos *qubits* envolve três etapas fundamentais: inicialização, controle e medição dos estados quânticos. O controle computacional é realizado por meio da aplicação de portas quânticas responsáveis por modificar os estados dos *qubits* segundo operações unitárias específicas (METER; DEVITT, 2016). Durante o processamento, estados auxiliares conhecidos como *ancilla qubits* podem ser utilizados em operações intermediárias e protocolos de correção de erros quânticos.

Os algoritmos quânticos representam uma das principais motivações para o desenvolvimento da computação quântica, uma vez que exploram diretamente os fenômenos da mecânica quântica para obter vantagens computacionais em relação aos algoritmos clássicos. Além do algoritmo de *Shor*, destacam-se o algoritmo de *Grover* para busca não estruturada, algoritmos variacionais híbridos e aplicações emergentes em otimização, aprendizado de máquina quântico e simulação molecular (PRESKILL, 2018) (GILL; BUYYA, 2024).

Atualmente, a computação quântica é considerada uma das principais fronteiras tecnológicas da ciência contemporânea. Governos, universidades e grandes empresas de tecnologia têm investido intensamente no desenvolvimento de processadores quânticos mais robustos, escaláveis e tolerantes a falhas (LAGHARI et al., 2022). Simultaneamente, o avanço das plataformas de computação quântica em nuvem vem ampliando o acesso remoto a processadores quânticos experimentais, permitindo o desenvolvimento de aplicações e pesquisas em diferentes áreas do conhecimento (GILL; BUYYA, 2024). Dessa forma, a computação quântica consolida-se como uma tecnologia estratégica para as próximas décadas, com potencial para transformar áreas como criptografia, inteligência artificial, otimização, modelagem científica e redes de comunicação.

2.1.3 Internet Quântica

Os conceitos de Internet Quântica e Redes Quânticas consolidaram-se como temas centrais da área da ciência da informação quântica, impulsionando pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos modelos de comunicação e processamento distribuído. Contrário das redes clássicas, possuindo transmissão de *bits* convencionais, a Internet Quântica baseia-se na manipulação de estados quânticos, em especial por meio do emaranhamento e da superposição, permitindo funcionalidades inviáveis nos sistemas tradicionais de comunicação. Nesse contexto, a Internet Quântica passou a ser tratada não apenas como uma possibilidade, mas como uma futura infraestrutura distribuída para comunicação, computação e sensoriamento quântico em larga escala (CALEFFI; CACCIAPUOTI; BIANCHI, 2018; CALEFFI; CACCIAPUOTI; BIANCHI, 2022; KOZLOWSKI; WEHNER, 2023).

Nesse contexto, a Internet Quântica mostra diferenças com a infraestrutura clássica. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as características principais de ambas, desta-

cando diferenças relacionadas à representação da informação, mecanismos de segurança, transmissão de dados e capacidade de detecção de interceptações (ABDULAZIZ; AL-HUSSAINI; ABDULRAZZAK, 2025).

Tabela 1 – Diferenças entre Internet Atual e Internet Quântica

Diferença	Internet Atual	Internet Quântica
Unidade de Informação	Bits	<i>qubits</i>
Rede de Transporte	Rádio, Satélite, Fibra,	Satélite e Fibra
Estados	Limitado	Concorrente
Representação	0 ou 1	0 e 1
Emenda	Porta Lógica	Porta Quântica

Adaptado de: Abdulaziz, Al-Hussaini e Abdulrazzak (2025)

Os avanços experimentais observados desde o final da década de 1990 contribuíram para consolidar a viabilidade prática dessas redes. Um dos marcos fundamentais ocorreu em 1997, com a demonstração do primeiro experimento de teletransporte quântico realizado por *Bouwmeester et al.* (BOUWMEESTER et al., 1997). O experimento deixou evidente a possibilidade de transferência de estados quânticos entre partículas espacialmente separadas, estabelecendo um dos princípios fundamentais para futuras arquiteturas de comunicação quântica. A partir desse resultado, foi intensificado os estudos relacionados à construção de memórias quânticas (LVOVSKY; SANDERS; TITTEL, 2009), à transferência eficiente de informação quântica (NORTHUP; BLATT, 2014) e ao desenvolvimento de dispositivos para processamento, controle e detecção de estados quânticos (AWSCHALOM et al., 2018).

Nesse cenário, destaca-se o trabalho de Wehner, Elkouss e Hanson (2018), que apresentou uma das primeiras arquiteturas abrangentes para a Internet Quântica, descrevendo aplicações, desafios tecnológicos e possíveis estágios de implementação. Os autores propuseram um roteiro para a construção de uma Rede Quântica inicial interligando cidades na Holanda, iniciativa posteriormente incorporada aos esforços da *Quantum Internet Alliance*, consórcio europeu voltado ao desenvolvimento de infraestrutura quântica em larga escala. Desde então, diversos programas internacionais têm acelerado a construção de redes experimentais, incluindo iniciativas nos Estados Unidos, China e União Europeia, com demonstrações recentes de enlaces quânticos metropolitanos e comunicações via satélite (CHEN et al., 2021; POMPILI et al., 2021).

Depois que a arquitetura proposta por *Wehner* consolidou a visão da Internet Quântica, as pesquisas passaram a concentrar esforços em demonstrações experimentais de Redes Quânticas multinó, protocolos de comunicação tolerantes a falhas e arquiteturas voltadas à interoperabilidade entre dispositivos heterogêneos (POMPILI et al., 2021; GYONGYOSI; IMRE, 2024). E também na definição de arquiteturas de rede, protocolos de comunicação e mecanismos de roteamento especificamente desenvolvidos para ambientes quânticos (CALEFFI; CACCIAPUOTI, 2026; CACCIAPUOTI; CALEFFI, 2026).

Paralelamente, os avanços da computação quântica intensificaram o interesse industrial e científico na chamada corrida quântica. Empresas como IBM, Google e Intel passaram a investir significativamente em hardware quântico, algoritmos e infraestrutura de comunicação. Um marco relevante ocorreu em 2019, quando pesquisadores do Google anunciaram a realização de um experimento de supremacia quântica, no qual um processador quântico executou uma tarefa específica considerada impraticável para computadores clássicos da época (DEBENEDICTIS, 2020). Embora existam debates acerca da terminologia e da abrangência prática desse resultado, o experimento evidenciou o rápido amadurecimento das tecnologias quânticas e reforçou a necessidade de futuras redes capazes de interligar processadores quânticos distribuídos.

Entre as aplicações mais promissoras da Internet Quântica destaca-se a distribuição quântica de chaves *Quantum Key Distribution (QKD)* (Figura 3), considerada uma das primeiras tecnologias quânticas com potencial de ampla adoção comercial. Nesse modelo, duas partes estabelecem uma chave criptográfica aleatória cuja segurança é garantida pelas propriedades da mecânica quântica, tornando possível detectar qualquer tentativa de interceptação da comunicação (EKERT, 1991; WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018). Além da QKD, a literatura também aponta aplicações relacionadas ao acesso seguro a computadores quânticos remotos (BROADBENT; FITZSIMONS; KASHEFI, 2009), sincronização ultra precisa de relógios (KÓMÁR et al., 2014), sensoriamento distribuído e interferometria astronômica baseada em emaranhamento (GOTTESMAN; JENNEWEIN; CROKE, 2012). Além disso, têm-se investigado mecanismos de distribuição quântica de chaves em cenários com dispositivos imperfeitos e ambientes reais de comunicação, ampliando a viabilidade prática da segurança quântica em redes futuras (XU et al., 2022).

Figura 3 – Aplicações de uma Internet Quântica



Fonte: (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018)

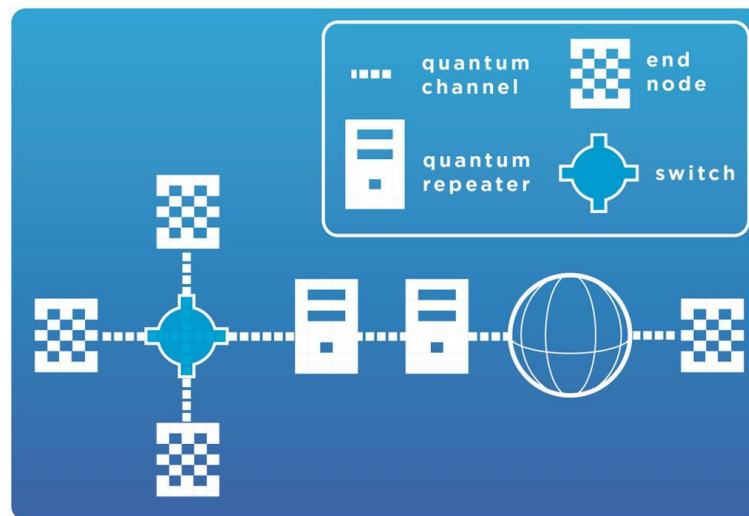
A segurança inerente às Redes Quânticas decorre diretamente das propriedades físicas dos *qubits*. Diferentemente da informação clássica, estados quânticos não podem ser copiados perfeitamente, conforme estabelecido pelo teorema da não clonagem. Além disso, pares de *qubits* emaranhados apresentam correlações que impossibilitam a interferência

de terceiros sem alteração detectável do sistema (DAMGÅRD et al., 2014). Essas características tornam a Internet Quântica particularmente relevante para aplicações críticas que demandam elevados níveis de segurança, como autenticação, distribuição de chaves criptográficas e proteção de infraestrutura digital sensível.

Outro aspecto central para a viabilização das Redes Quânticas refere-se à distância de transmissão. A propagação de estados quânticos em fibras ópticas está sujeita à decoerência e à perda de fótons, fatores que limitam significativamente o alcance das comunicações diretas. Em razão disso, grande parte das pesquisas concentra-se no desenvolvimento de repetidores quânticos, memórias quânticas robustas e protocolos de emaranhamento remoto (SANGOUARD et al., 2011). Nesse contexto, os repetidores quânticos assumem papel fundamental para ampliar a escalabilidade das Redes Quânticas, permitindo a distribuição de emaranhamento em longas distâncias com menor degradação dos estados quânticos (MURALIDHARAN et al., 2022).

A Figura 4 apresenta uma arquitetura de uma Internet Quântica, composta por nós quânticos, repetidores e canais de comunicação responsáveis pela distribuição de estados quânticos entre dispositivos remotos (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018).

Figura 4 – Arquitetura de uma Internet Quântica



Fonte: (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018)

Outro aspecto central para a viabilização das Redes Quânticas refere-se à distância de transmissão. A propagação de estados quânticos em fibras ópticas está sujeita à decoerência e à perda de fótons, fatores que limitam significativamente o alcance das comunicações diretas. Em razão disso, grande parte das pesquisas recentes concentra-se no desenvolvimento de repetidores quânticos, memórias quânticas robustas e protocolos de emaranhamento remoto (SANGOUARD et al., 2011). Nesse contexto, os repetidores quânticos assumem papel fundamental para ampliar a escalabilidade das Redes Quânticas, permitindo a distribuição de emaranhamento em longas distâncias com menor degradação

dos estados quânticos (MURALIDHARAN et al., 2022).

Experimentos ao longo dos últimos anos têm demonstrado avanços importantes na nesse sentido, incluindo a distribuição de emaranhamento em enlaces metropolitanos e interurbanos por meio de fibras ópticas e sistemas híbridos de comunicação (LEWELLYN et al., 2020; YU et al., 2020). A partir de 2021, pesquisas passaram a evidenciar Redes Quânticas multinó, protocolos de entrega de emaranhamento e comunicação entre *qubits* remotamente conectados (POMPILI et al., 2021; POMPILI et al., 2022). Mais recentemente, entre 2024 e 2026, diferentes grupos de pesquisa implementaram Redes Quânticas metropolitanas utilizando infraestrutura óptica urbana, integração entre memórias quânticas e redes de telecomunicações, além de experimentos de computação quântica distribuída e arquiteturas heterogêneas voltadas à ampliação da escalabilidade (LIU et al., 2024; KNAUT et al., 2024; PITTALUGA et al., 2025; CUI et al., 2026).

Dessa forma, a Internet Quântica pode ser compreendida como uma evolução das redes de comunicação tradicionais, apoiada na integração entre computação quântica, transmissão quântica de informação e processamento distribuído. Embora ainda existam desafios tecnológicos significativos relacionados à escalabilidade, estabilidade dos *qubits*, correção de erros e padronização de protocolos, os avanços demonstram que as Redes Quânticas deixaram de ser apenas uma construção teórica, passando gradualmente para um estágio de implementação experimental e desenvolvimento pré-comercial. Além disso, também têm-se direcionado esforços para o desenvolvimento de simuladores e emuladores capazes de avaliar protocolos, arquiteturas e estratégias de distribuição de emaranhamento antes da implantação de redes físicas. Essas ferramentas têm se tornado fundamentais para acelerar o desenvolvimento da futura Internet Quântica (DOOLITTLE; CUBEDDU, 2026).

2.1.4 Prospecção do Conhecimento

A prospecção do conhecimento consiste na aplicação de métodos com a finalidade de identificar tendências, lacunas e trajetórias de evolução de uma determinada área de pesquisa, para compreender como o conhecimento é produzido, consolidado e disseminado ao longo do tempo. De maneira geral, esses métodos podem ser classificados em qualitativos, quantitativos e híbridos. Os métodos qualitativos fundamentam-se na experiência de especialistas, destacando-se o Método *Delphi* e a TRIZ, enquanto os métodos quantitativos utilizam grandes volumes de dados provenientes de documentos científicos, patentes e outras bases de informação para identificar padrões de evolução do conhecimento (COATES et al., 2001; PORTER; CUNNINGHAM, 2005).

No contexto da literatura científica, a prospecção quantitativa tem sido realizada por meio da análise de redes de citações, que utiliza as relações de citação entre documentos científicos para reconstruir a evolução histórica de uma área do conhecimento. Essa abordagem permite representar a estrutura do conhecimento de uma área de pesquisa e

compreender como as contribuições científicas se relacionam ao longo do tempo, possibilitando identificar trabalhos, artigos de consolidação e estudos responsáveis pela introdução de novos avanços científicos (COATES et al., 2001; PORTER; CUNNINGHAM, 2005).

A fundamentação dessa abordagem encontra-se na *Análise de Redes Sociais (ARS)*, do inglês *Social Network Analysis (SNA)*, que consiste em um conjunto de métodos quantitativos destinados à representação e análise de estruturas relacionais (WASSERMAN; FAUST, 1994; CARRINGTON; SCOTT; WASSERMAN, 2005). Baseada na Teoria dos Grafos, a ARS representa os elementos da rede como nós e suas relações como arestas, possibilitando investigar características como conectividade, centralidade, densidade, distância e fluxo de informação (BORGATTI et al., 2009; BUTTS, 2008). Embora originalmente desenvolvida para o estudo das relações sociais entre indivíduos e organizações, a ARS passou a ser empregada em estudos bibliométricos e cientométricos.

Nesse contexto, artigos científicos são representados como nós e as arestas correspondem às relações de citação existentes entre eles. Essas conexões representam o fluxo de transmissão do conhecimento científico, permitindo analisar a evolução de um determinado campo de pesquisa e identificar como novas contribuições se fundamentam em trabalhos anteriores (ZUPIC; CATER, 2015). Com base nessa representação em rede, Hummon e Doreian (1989) propuseram a *Main Path Analysis (MPA)*, uma metodologia destinada à identificação dos principais caminhos do conhecimento em redes de citações. A proposta parte do princípio de que nem todas as citações possuem a mesma importância para a evolução de uma área científica, sendo possível identificar subconjuntos de conexões que exercem maior influência na evolução de um tema.

Para identificar esses caminhos, foi proposto diferentes métricas de busca, dentre elas o *Search Path Count (SPC)*, o *Search Path Node Pair (SPNP)*, e o *Search Path Link Count (SPLC)*. Essas métricas atribuem pesos às ligações existentes entre os documentos da rede, permitindo identificar quais conexões são mais relevantes. O *SPLC* destaca-se por contabilizar a frequência com que cada ligação participa dos diferentes caminhos possíveis entre os documentos de origem e os documentos finais da rede. Dessa forma, conexões presentes em um maior número de trajetórias recebem maior peso, evidenciando os caminhos mais representativos da evolução do conhecimento (HUMMON; DOREIAN, 1989).

Embora a MPA tenha sido mais empregada em estudos de prospecção tecnológica baseados em patentes, como demonstrado por Verspagen (VERSPAGEN, 2007), sua aplicação não se restringe às patentes. A metodologia fundamenta-se na estrutura das redes de citações, podendo ser utilizada em qualquer rede direcionada acíclica *Directed Acyclic Graph (DAG)*, incluindo redes formadas por artigos científicos.

Assim, Batagelj (2003) desenvolveu algoritmos para processamento de grandes redes de citações, permitindo a aplicação prática da MPA em grandes bases científicas, voltadas à reconstrução da evolução do conhecimento científico.

Assim, a identificação das rotas do conhecimento consiste na reconstrução dos principais caminhos percorridos pelo conhecimento científico ao longo do tempo, evidenciando os trabalhos que possuem base teórica, os estudos responsáveis pela consolidação da área e as pesquisas que impulsionaram novas direções de pesquisa. Diferentemente da simples contagem de citações, essa abordagem considera a estrutura total da rede de citações, permitindo compreender como o conhecimento evoluiu e quais documentos desempenharam papel principal nesse processo.

2.2 Trabalhos Correlatos

Entre os trabalhos pioneiros da área, destaca-se o estudo de Kimble (KIMBLE, 2008), que apresentou uma visão inicial para a construção de uma Internet Quântica baseada na interconexão de dispositivos quânticos distribuídos. Esse trabalho é bastante reconhecido como um marco inicial do campo por estabelecer os principais desafios tecnológicos associados à transmissão de estados quânticos em larga escala. Posteriormente, Wehner, Elkouss e Hanson (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018) ampliaram essa discussão ao apresentar um *roadmap* para a Internet Quântica, descrevendo-a como uma nova infraestrutura de comunicação capaz de oferecer aplicações novas em segurança, computação distribuída, sincronização de sistemas e sensoriamento quântico.

Com o amadurecimento da área, as pesquisas passaram a concentrar esforços no desenvolvimento de arquiteturas e protocolos específicos para Redes Quânticas. Nesse contexto, diversos estudos buscaram adaptar conceitos tradicionais de redes de computadores ao ambiente quântico, propondo modelos arquiteturais, mecanismos de roteamento e estratégias para distribuição de emaranhamento. Essas contribuições foram fundamentais para transformar a Internet Quântica de uma visão conceitual em uma área estruturada de investigação científica.

Paralelo aos avanços teóricos, diferentes pesquisas têm demonstrado resultados experimentais relevantes nas comunicações quânticas. Trabalhos recentes elucidaram a distribuição de emaranhamento em enlaces metropolitanos e interurbanos utilizando fibras ópticas e sistemas híbridos de transmissão (LLEWELLYN et al., 2020; YU et al., 2020). Em paralelo, experimentos envolvendo satélites quânticos evidenciaram a viabilidade da distribuição quântica de chaves em longas distâncias, representando um importante passo para a implementação de redes globais seguras (YIN et al., 2017). Esses avanços demonstram uma transição gradual das pesquisas predominantemente teóricas para aplicações experimentais cada vez mais próximas de cenários reais.

Outro marco importante foi alcançado com a demonstração de Redes Quânticas multínó e a implementação de pilhas de protocolos para comunicação quântica, aproximando a Internet Quântica das arquiteturas tradicionalmente utilizadas na Internet clássica. Esses resultados evidenciam o progresso contínuo da área em direção à construção de Redes

Quânticas.

Outra vertente significativa das pesquisas atuais está relacionada ao desenvolvimento de repetidores quânticos e arquiteturas híbridas de comunicação. Segundo Awschalom et al. (AWSCHALOM et al., 2021), a integração entre sistemas quânticos e infraestruturas clássicas de telecomunicações constitui um dos principais desafios para a consolidação de Redes Quânticas em larga escala. Questões relacionadas à decoerência, perdas em canais ópticos, sincronização e estabilidade do emaranhamento continuam sendo obstáculos relevantes para a implementação prática da Internet Quântica.

Além dos desafios tecnológicos, estudos recentes têm associado o desenvolvimento da Internet Quântica à evolução das futuras infraestruturas globais de comunicação. Pesquisas relacionadas ao 6G indicam que as próximas gerações de redes deverão incorporar inteligência distribuída, segurança avançada e novos modelos computacionais (SAAD; BENNIS; CHEN, 2020; LETAIEF et al., 2019). Nesse cenário, as tecnologias quânticas passam a ser consideradas elementos estratégicos para o futuro das comunicações globais.

Embora a literatura apresente avanços significativos na definição teórica da Internet Quântica, no desenvolvimento de arquiteturas de rede, na proposição de protocolos de comunicação e na realização de experimentos em ambientes reais, observa-se que a maior parte dessas pesquisas concentra-se na resolução de desafios técnicos e na validação de soluções tecnológicas. Dessa forma, o conhecimento científico existente contribuiu significativamente para a consolidação dos fundamentos da Internet Quântica e para a demonstração de sua viabilidade técnica.

Entretanto, ainda são escassos os estudos dedicados à análise da evolução científica do tema como um todo. Em particular, observa-se uma carência em abordagens baseadas em análise estatística descritiva e em redes de citações capazes de identificar os trabalhos teóricos, as principais trajetórias de desenvolvimento científico e os temas que impulsionaram a consolidação da Internet Quântica ao longo do tempo. Entre essas abordagens destacam-se as técnicas de análise de rotas científicas de conhecimento *MPA*, originalmente propostas por (HUMMON; DOREIAN, 1989), que utilizam métricas como *SPLC* e *SPNP* para identificar os caminhos de conhecimento mais influentes em uma rede de citações. Consequentemente, permanecem lacunas relacionadas à compreensão de como o conhecimento científico da área foi construído, quais pesquisas exerceram maior influência em sua evolução e quais tendências emergem para o futuro dessa tecnologia.

A análise da evolução científica de uma área do conhecimento exige metodologias capazes de identificar não apenas os trabalhos mais influentes, mas também as trajetórias por meio das quais o conhecimento se consolidou ao longo do tempo. Nesse contexto, Chen et al. (2014) definem a descoberta da rota de conhecimento (*Path Knowledge Discovery*) como a exploração das relações entre conceitos em diferentes áreas, conectando-os com o objetivo de formar um caminho lógico que revele padrões e conexões entre os mais diversos campos de estudo (CHEN et al., 2014).

Essa abordagem tem sido amplamente adotada em pesquisas anteriores. Usai et al. (2018), por exemplo, compilaram mais de 80 artigos que utilizam mineração de texto para mapear rotas de conhecimento em distintas áreas (USAI et al., 2018). Na área da saúde, Liu et al. (2014) aplicaram técnicas de mineração de texto a partir de um estudo do Consórcio para a Fenômina Neuropsiquiátrica da Universidade da Califórnia em Los Angeles, reunindo genes, sintomas e áreas cerebrais afetadas pela esquizofrenia, com o objetivo de identificar padrões que pudessem contribuir para o tratamento e a prevenção do distúrbio (LIU et al., 2014).

Uma das metodologias mais utilizadas para esse tipo de mapeamento foi proposta por Verspagen (2007), que utiliza análise de redes e citações de patentes para identificar os melhores caminhos e apontar as principais rotas tecnológicas de um determinado campo. As medidas propostas *SPNP* e *SPLC* — baseiam-se na construção de uma rede direcionada de patentes que, ao serem ordenadas em sequência, revelam as diferentes rotas tecnológicas percorridas ao longo do tempo (VERSPAGEN, 2007; PAULO; PAULO; PORTO, 2017).

Estudos posteriores consolidaram o uso dessa metodologia na prospecção tecnológica a partir de patentes. Paulo (2019), por exemplo, aplicou-a para determinar a configuração das rotas tecnológicas da energia solar, identificando as tecnologias mais emergentes do setor (PAULO; PAULO; PORTO, 2017).

Paulo e Porto (2018) analisaram patentes relacionadas à energia solar publicadas no Japão e no Brasil entre 1997 e 2016, utilizando análise de rede social e o algoritmo SPLC para identificar rotas tecnológicas, tendências, tecnologias promissoras, características de cooperação e mercados de proteção. Segundo os autores, o mapeamento dessas informações pode apoiar governos, empresas e universidades em decisões estratégicas, fornecendo subsídios para a inteligência tecnológica competitiva (PAULO; PORTO, 2018).

A metodologia também tem se mostrado relevante no setor da saúde. Picanço-Castro et al. (2020) exploraram patentes e terapias CAR-T em desenvolvimento — uma abordagem inovadora no tratamento de cânceres, identificando segmentos-chave da terapia, tendências atuais, principais atores, dinâmica de cooperação institucional e futuros caminhos de inovação. O estudo fornece informações estratégicas para que cientistas da academia e da indústria possam elaborar planos de pesquisa mais assertivos sobre o tema (PICANCO-CASTRO et al., 2020).

Em termos de aplicação prática dos resultados, Linares, Paulo e Porto (2019) reuniram informações sobre patentes em biotecnologia, identificando as tecnologias mais promissoras e o nível de colaboração entre as instituições do setor. Os conhecimentos gerados foram utilizados por uma empresa da área para avançar em seus projetos de desenvolvimento tecnológico, evidenciando o potencial da análise de rotas de conhecimento não apenas como ferramenta acadêmica, mas também como suporte direto à tomada de decisão (LINARES; PAULO; PORTO, 2019).

Com foco em caracterizar a evolução dos estudos científicos sobre coronavírus, uma

pesquisa realizada por pesquisadores afiliados a instituições brasileiras, foi inspirado nos processos do *Knowledge Discovery in Databases (KDD)*, os autores extraíram os dados a partir de artigos publicados na *Web of Science* até 2021, construíram uma rede de citações e, por meio do algoritmo *SPLC*, identificaram as rotas de conhecimento (PAULO; LIMA, 2022). Também foi utilizado a análise de redes e o algoritmo *SPLC* para explorar e caracterizar as relações entre artigos científicos produzidos pelas principais universidades do estado de Goiás, identificando por meio de rotas de conhecimento a evolução dos trabalhos acadêmicos da região (LIMA; PAULO, 2023).

Outro exemplo de aplicação da análise de rotas de conhecimento, é o de (PAULO; CALVET, 2022), que investigaram a evolução do conhecimento científico sobre a *Internet das Coisas (IoT)* e casas inteligentes (*Smart Homes*). Para isso, os autores empregaram dados de artigos indexados na *Web of Science* entre 2010 e 2021, utilizando análise de redes de citação em conjunto com o método *SPLC* para construir a rede de citações e mapear o principal caminho do conhecimento na área (PAULO; CALVET, 2022).

Em uma pesquisa recente, foi analisado 9.142 artigos sobre Inteligência Artificial e tomada de decisão indexados na *Scopus* entre 1971 e 2024, utilizando análise de citações, redes de coautoria e análise de palavras-chave para mapear a trajetória do conhecimento na área (PAULO; BRAMBILLA, 2025). Já sobre sob uma perspectiva regional, em outro trabalho foi analisado as características da conhecimento científica e tecnológica em universidades do estado de Goiás, mapeando 31.765 artigos e 161 patentes produzidos por pesquisadores afiliados a instituições goianas no período de 1982 a 2022. A partir das bases *Scopus*, *Web of Science*, *SciELO* e *Derwent Innovation*, os autores construíram redes de citação e analisaram indicadores de colaboração (PAULO; PAIXÃO, 2025).

Dessa forma, a presente pesquisa busca contribuir para a literatura ao analisar a evolução científica da Internet Quântica por meio da análise estatística descritiva e da identificação de rotas de conhecimento em redes de citação, permitindo compreender como esse tema se estruturou ao longo do tempo e quais trabalhos exerceram maior influência em seu desenvolvimento.

Método de Pesquisa

Este capítulo apresenta o método de pesquisa adotado para o desenvolvimento desta dissertação. Inicialmente, é apresentada a caracterização da pesquisa, seguida da fundamentação teórica dos procedimentos metodológicos empregados em cada etapa (construção da base científica, tratamento e padronização dos dados, análise estatística descritiva, identificação das rotas científicas e consolidação dos resultados). O conjunto dessas etapas constitui a abordagem metodológica utilizada para analisar a evolução científica da Internet Quântica e Redes Quânticas.

3.1 Caracterização da Pesquisa

Esta pesquisa caracteriza-se como descritiva e quantitativa, apoiada na análise de dados extraídos da literatura científica sobre Internet Quântica e Redes Quânticas. A pesquisa está inserida no contexto da prospecção científica, utilizando técnicas de análise estatística descritiva, análise de redes de citação para investigar a evolução científica ao longo do tempo (BUSSAB; MORETTIN, 2017; JUNIOR et al., 2019).

O caráter descritivo da pesquisa está associado à caracterização do conhecimento científico relacionada à Internet Quântica e Redes Quânticas, buscando identificar padrões de crescimento, distribuição e evolução do conhecimento científico. Para isso, são empregadas técnicas de estatística descritiva que permitem sintetizar e representar informações referentes à evolução das publicações, autores, instituições, países, periódicos e demais características (LEVINE; STEPHAN; SZETELA, 2022).

Além da caracterização do conhecimento científico, a pesquisa busca compreender a trajetória de desenvolvimento do conhecimento por meio da identificação das principais rotas de conhecimento. Para isso, foi utilizado a análise de caminho principal em redes de citação, permitindo identificar os trabalhos que desempenharam papel relevante na construção e consolidação da literatura científica sobre Internet Quântica (HUMMON; DOREIAN, 1989; BATAGELJ, 2003; ZUPIC; CATER, 2015).

3.2 Procedimentos Metodológicos

Esta pesquisa propõe uma abordagem para análise da evolução científica da Internet Quântica associada a análise estatística descritiva, identificação de rotas de conhecimento e consulta a especialistas. A principal contribuição do método consiste na combinação dessas diferentes abordagens para caracterizar a evolução científica da Internet Quântica e avaliar sua trajetória de desenvolvimento. As próximas subetapas, descrevem no detalhe cada método.

3.2.1 Análise Estatística Descritiva

A estatística descritiva é um conjunto de técnicas voltado a organização, ao resumo e a apresentação dos dados por meio de tabelas, gráficos e medidas sintéticas, como frequências, porcentagens, médias e medidas de dispersão (BUSSAB; MORETTIN, 2017). Nesse tipo de investigação, o autor busca descrever, registrar e interpretar os fatos observados, sem intervir diretamente sobre eles, com o objetivo de elaborar uma representação sistemática das características que definem o objeto de estudo (GIL, 2022).

Conforme proposto por Junior et al. (2019), a estatística descritiva permite reduzir e estruturar grandes volumes de dados em indicadores compreensíveis, possibilitando a identificação de padrões, tendências e comportamentos no conjunto de publicações analisado. A aplicação dessa técnica à base científica construída fornece uma visão abrangente da evolução da área, contribuindo com a análise de redes de citação e a identificação das rotas de conhecimento (STROZZI; GARAGIOLA; TRUCCO, 2019).

Nesta pesquisa, a análise estatística descritiva verifica os indicadores relacionados aos artigos, aos autores, as instituições de afiliação, aos países de origem, aos periódicos de publicação, a quantidade de citações e a evolução das publicações ao longo do tempo sobre Internet Quântica. Para a elaboração dos gráficos e das tabelas que geram esses indicadores, utiliza-se o software *Microsoft Excel*, adotado em pesquisas científicas para o tratamento e a visualização de dados quantitativos (LEVINE; STEPHAN; SZETELA, 2022).

3.2.2 Identificação das Rotas de Conhecimento

A identificação de rotas de conhecimento consiste em um conjunto de técnicas utilizadas para compreender a evolução de um tema a partir das relações de citação existentes entre as publicações. Essa análise procura identificar como o conhecimento foi construído ao longo do tempo, evidenciando os trabalhos que exerceram maior influência na consolidação da área de pesquisa (HUMMON; DOREIAN, 1989; BATAGELJ, 2003; ZUPIC; CATER, 2015).

A base conceitual dessa abordagem encontra-se na *ARS* ou *SNA*, metodologia empregada para investigar estruturas formadas por indivíduos e pelas relações existentes entre eles (WASSERMAN; FAUST, 1994; CARRINGTON; SCOTT; WASSERMAN, 2005). Em uma rede, os elementos são representados por nós (*nodes*), enquanto as relações entre eles são representadas por arestas (*edges*), formando um grafo direcionado ou não direcionado. Embora a *ARS* tenha surgido para estudar relações entre indivíduos e organizações, sua aplicação foi posteriormente estendida à análise do conhecimento científico, permitindo representar artigos, autores, instituições e demais elementos como componentes de uma rede de conhecimento (BORGATTI et al., 2009; BUTTS, 2008).

Uma das aplicações da *ARS* consiste na construção de redes de citação científica. Onde cada nó corresponde a uma publicação científica, enquanto cada aresta representa uma relação de citação entre dois artigos. Assim, quando um artigo cita outro, estabelece-se uma ligação direcionada entre ambos, permitindo reconstruir o fluxo do conhecimento ao longo do tempo (ZUPIC; CATER, 2015).

A construção dessas redes pode utilizar diferentes tipos de relações bibliográficas, como *co-citation*, *bibliographic coupling* e redes baseadas em citações diretas. Para a identificação de rotas de conhecimento, utiliza-se a rede baseada em citações diretas, construída a partir das referências bibliográficas presentes em cada publicação (*backward citations*). Nesse modelo, cada artigo é conectado aos trabalhos anteriormente citados em sua lista de referências, permitindo reconstruir o caminho do desenvolvimento científico da área investigada (VERSPAGEN, 2007; FONTANA; NUVOLARI; VERSPAGEN, 2009).

Alguns softwares são usados para trabalhar com esse tipo de dados, e gerar a rota. Dentre os mais utilizados, podemos citar: UCINET, Pajek e Gephi (FAVRE; BRAILLY, 2012). O Gephi(<<https://gephi.org>>), é um software livre e de código aberto voltado à análise, visualização e exploração de grafos e redes complexas, disponível para os sistemas operacionais Windows, Linux e macOS. A ferramenta disponibiliza um conjunto de recursos para análise de dados relacionais, permitindo identificar padrões, tendências e estruturas presentes em diferentes tipos de redes por meio de uma interface.

Uma vez construída a rede de citações, torna-se possível aplicar técnicas de busca pelos caminhos mais relevantes percorridos pelo conhecimento no interior da rede. Essas técnicas analisam não apenas o número de citações recebidas por cada publicação, mas, sobretudo, a importância das conexões estabelecidas entre os trabalhos (HUMMON; DOREIAN, 1989). Entre os métodos mais utilizados, destaca-se o plugin SPLC, proposto por Hummon e Doreian (1989), que atribui pesos às arestas da rede de acordo com a frequência com que cada ligação participa dos diferentes caminhos possíveis entre os artigos. Desse modo, as conexões utilizadas por um maior número de trajetos recebem maior relevância, evidenciando os caminhos que melhor representam a evolução do conhecimento (HUMMON; DOREIAN, 1989; BATAGELJ, 2003; VERSPAGEN, 2007).

Além do SPLC, este trabalho apresenta também o plugin Search Path Link Count

- Dynamic Programming (SPLC-DP), a maior contribuição dessa pesquisa, uma versão do algoritmo voltada a redes de grande porte e muito conectadas. O SPLC, em sua implementação original, não recebia atualizações havia alguns anos em razão de sua complexidade, e, por muito tempo, o uso da ferramenta restringiu-se a versões mais antigas do Gephi, nas quais não era possível processar redes de grande escala. No presente trabalho, foi possível atualizar o plugin por meio de uma ferramenta de IA, o Claude Code(<<https://claude.com>>), que empregando técnicas de programação dinâmica e, como consequência, viabilizando sua execução na versão mais recente do Gephi.

Dessa forma, as rotas de conhecimento correspondem aos caminhos mais relevantes identificados na rede de citações após a aplicação do plugin SPLC-DP. Essa rota representa a sequência de publicações que exerceram maior influência na construção e na disseminação do conhecimento em determinada área científica, permitindo identificar trabalhos com base teórica, contribuições intermediárias, pesquisas mais recentes que consolidaram ou expandiram a área de estudo e as tendências ao longo do tempo.(FONTANA; NUVOLARI; VERSPAGEN, 2009; STROZZI; GARAGIOLA; TRUCCO, 2019).

3.3 Consolidação dos Resultados

Na etapa final, será consolidado os resultados das análises estatísticas descritivas e da rota de conhecimento.

A combinação desses procedimentos permite construir uma visão da evolução do conhecimento da Internet Quântica e Redes Quânticas, identificando seus principais avanços, desafios, tendências de pesquisa e perspectivas futuras.

Experimentos e Análise dos Resultados

Para apresentação dos resultados, foi realizada uma divisão para explicar de forma mais organizada, as informações extraídas pelas bases de conhecimento.

4.1 Método para a Avaliação

Para melhor descrever o processo metodológico, na Figura 5, é possível visualizar via fluxograma, passo a passo, as etapas percorridas desde a seleção dos artigos até a análise e interpretação do que foi investigado.

Figura 5 – Etapas Metodológicas



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.1.1 Seleção e extração dos dados

A primeira etapa aplicada foi a seleção dos dados. Após escolhido o recorte da pesquisa, **Internet Quântica ou Redes Quânticas**, buscou-se bases de dados que pudesse reunir a maior concentração de artigos sobre os temas, fornecesse os dados relevantes, bem como com as referências citadas dentro de cada artigo científico. Para isso, as bases de dados *Scopus* e *Web of Science* foram escolhidos pela ampla cobertura, qualidade dos metadados, influência e reconhecimento pela comunidade científica.

A segunda etapa foi a coleta de publicações relacionadas à Internet Quântica e Redes Quânticas. A estratégia de busca foi definida a partir de termos escolhidos e operações lógicas que utilizaram o seguinte script em cada base:

❑ *Web of Science*

“QUANTUM INTERNET” (TOPIC) OR “QUANTUM NETWORK” (Topic) AND 1900-2025 (YEAR PUBLISHED) AND ARTICLE OR PROCEEDINGS PAPER OR REVIEW (DOCUMENT)

❑ *Scopus*

(TITLE-ABS-KEY (“QUANTUM INTERNET”) OR TITLE-ABS-KEY (“QUANTUM NETWORK”)) AND < 2026 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "AR") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "CP") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "RE"))

As buscas foram realizadas considerando artigos científico, trabalhos publicados em anais de conferências e revistas, abrangendo o período até 2025. Foram coletados um total de **9.404** artigos sobre o tema, sendo **3.257** da *Web of Science* e **6.147** da *Scopus*. Após a recuperação dos registros, os resultados foram consolidados em uma única base de dados, formato xlsx para ser tratado na ferramenta Excel da *Microsoft*. Os registros coletados incluíram informações referentes a autores, títulos, resumos, palavras-chave, afiliações institucionais, referências bibliográficas e demais elementos relevantes para a pesquisa.

4.1.2 Tratamento e Padronização dos Dados

Após a consolidação das duas coletas em uma base de dados, foi eliminado os registros duplicados a partir do campo *Digital Object Identifier System (DOI)*, totalizando **6.242** artigos, na sequência o arquivo base da pesquisa foi duplicado para serem tratados, padronizados e analisados separadamente, de acordo com o seu objetivo para garantir consistência e qualidade em cada uma das análises, conforme a Tabela 2 aponta.

O Arquivo A utilizou a maioria das informações da base de dados, em especial os campos Autores e Filiações, estavam preenchidos dentro de uma mesma célula do Excel, separados por ponto e vírgula, então foi necessário separá-las em registros diferentes para

Tabela 2 – Divisão dos Arquivos utilizados

Nome do Arquivo	Objetivo da Análise
Arquivo A	Análise descritiva dos dados
Arquivo B	Análise da rota de conhecimento

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

fazer o cruzamento de dados entre os autores, filiações e seus respectivos títulos. Esse processo foi realizado por meio de uma ferramenta dentro do Excel, o *Power Query*, utilizando a opção de transformar colunas em linhas. O resultado é cada autor vira uma linha com o título repetido, e assim, da mesma forma para a filiação. Com isso, foi possível gerar todas as estatísticas descritivas desejadas.

O Arquivo B, foi tratado para ser importado dentro da ferramenta Gephi, onde é possível aplicar o algoritmo do *SPLC-DP*, responsável por gerar a visualização da Rota do Conhecimento. Para criar a rota, era necessário encontrar um campo identificador que pudesse relacionar os artigos científicos com as suas referências citadas. Partindo deste pressuposto, foi escolhido o *DOI* como campo identificador dos artigos. O *DOI* é um código identificador de qualquer item digital, como revistas científicas até códigos individualizados para artigos e resumos de trabalhos em eventos acadêmicos.

O primeiro passo foi desconsiderar as informações secundárias que não seriam necessárias para a construção da rota. A partir dos campos que armazenam as informações sobre o *DOI* e referências citadas, foi possível iniciar o tratamento da base. As referências citadas estavam preenchidas dentro de uma mesma célula do Excel, então foi necessário separá-las em registros diferentes para fazer o cruzamento de dados entre os artigos e suas respectivas referências citadas. Esse processo foi realizado também por meio do *Power Query*, dentro do Excel, utilizando a opção de transformar colunas em linhas.

Utilizando essa opção, foi possível separar as referências citadas que estavam conectadas em um mesmo registro. Então cada linha possui a informação do *DOI* do artigo publicado e o *DOI* da sua referência citada. Uma observação importante nessa etapa, é que para os artigos que não tinha o *DOI* em suas referências, foi utilizado posteriormente, por meio das APIs do *OpenAlex* e *Crossref*, os títulos para recuperação dos respectivos *DOIs*, empregando critérios de similaridade textual para validação das correspondências, no total **248.740** linhas. Os *DOIs* recuperados foram associados novamente às referências originais, resultando em uma base contendo o *DOI* do artigo de origem e o *DOI* correspondente da referência.

A fase final do tratamento do arquivo B foi realizar o último saneamento: removeu-se *DOIs* fora do padrão, eliminou-se referências citadas, ciclos e registros que possuíam preenchimento anônimo. O resultado do Arquivo B, completamente tratado, foi uma planilha de **163.601** registros.

4.1.3 Estruturação dos dados para análise

Conforme apresentado na Tabela 2, cada arquivo gerado possui um objetivo de análise específico. A descrição dessa etapa é importante para reforçar a divisão dos arquivos que foram estruturados após a fase de tratamento, uma vez que cada será utilizado de forma diferente durante as próximas etapas da metodologia, de acordo com seu objetivo de análise.

Ao final do processo de tratamento, obteve-se uma base de dados consolidada para a realização das análises estatísticas descritivas quanto para a identificação das rotas científicas da Internet Quântica.

O Arquivo A foi tratado e analisado no Microsoft Excel, utilizando os 6.242 registros, com objetivo de extrair as análises estatísticas descritivas sobre o conhecimento científico de Internet Quântica e Redes Quânticas, contemplando indicadores relacionados às publicações, autores, instituições, periódicos, países e demais características.

O Arquivo B também foi tratado no Microsoft Excel e, posteriormente, importado para a ferramenta *Gephi*, onde foi utilizada a técnica de análise de redes de citação para a construção da rota de conhecimento, a partir do algoritmo *SPLC-DP*.

4.1.4 Criação dos modelos de visualização

A finalidade dessa etapa, começa com a elaboração das visualizações dos dados para extrair as informações relevantes para a pesquisa. Como já descrito anteriormente, o Arquivo A foi tratado dentro da ferramenta Excel e, o objetivo de análise deste arquivo, é gerar visualizações para análises descritivas dos dados selecionados. Os dados permitiram, por exemplo, uma análise de frequência sobre o tema abordado, acompanhando o crescimento da área ao longo do tempo, os principais setores, países e autores acadêmicos que exploram esse campo de conhecimento. As visualizações geradas com as estatísticas mais descritivas, auxiliaram no entendimento sobre área de pesquisa da Internet Quântica e Redes Quânticas.

Enquanto o Arquivo B, a proposta é representar e analisar a rota do conhecimento em relação ao tema abordado. Importando este arquivo na plataforma *Gephi*, é possível criar a rede de citação entre os artigos científicos e, a partir disso, realizar análises com base nas conexões mais relevantes, e para isso utilizar o algoritmo *SPLC-DP*, para gerar a visualização da rota de conhecimento que representa a ligação entre os dados (artigos científicos e suas citações).

Para Linares, Paulo e Porto (2019), o *SPLC*, a partir da contagem de todas as possíveis rotas da rede, mede a frequência das patentes que se localizam nas diferentes rotas, sendo que as rotas que possuem mais conexões sinalizam o rumo principal da tecnologia. Adaptando para esse trabalho, as patentes são os artigos científicos e busca-se identificar as rotas com mais conexões para identificar o rumo principal do conhecimento sobre o

tema abordado aqui. O conceito chave é de que quanto mais rotas um artigo científico conectar, mais importante ele é para a rede como um todo. Então, para analisar redes de citação e a rota de conhecimento, será observado a espessura das arestas e o tamanho dos nós.

Dentro do *Gephi*, é possível identificar tais observações, e podem ser aplicadas diversas estatísticas de ARS que permitirão investigar características na rede para complementar a análise. A estatística mais importante neste trabalho, para analisar a rota de conhecimento, foi a de Centralidade de Intermediação (*Betweenness centrality*). É possível que as ligações tenham pesos diferentes, o que explica o peso da sua representatividade em cada relação. Para isso, é necessário calcular a intermediação que conectam dois nós diferentes através de um outro nó, o mediador (NEWMAN, 2010). Outras estatísticas também podem ser caracterizadas a partir da base de dados, são elas: Grau Médio, Grau Médio Ponderado, Diâmetro da Rede e Comprimento Médio do Caminho. A Tabela abaixo explica seus conceitos:

Tabela 3 – Estatísticas de rede utilizadas e seus conceitos

Estatística	Conceito
Grau médio	Número médio de conexões por nó na rede. Essa medida indica o nível médio de conectividade entre os nós.
Grau ponderado médio	Número médio de conexões considerando os pesos das arestas. Diferentemente do grau médio, incorpora a intensidade ou a frequência das relações entre os nós.
Diâmetro da rede	Maior distância geodésica entre dois nós da rede, correspondente ao maior caminho mínimo existente entre quaisquer pares de nós.
Comprimento médio do caminho	Média dos menores caminhos entre todos os pares de nós da rede. Essa medida representa, em média, o número de passos necessários para conectar um nó a outro.

Fonte: Adaptado de (NEWMAN, 2010; EASLEY; KLEINBERG, 2010) pelo autor.

4.1.5 Análise e Interpretação dos dados

Após as etapas de coleta, tratamento e organização dos dados, iniciou-se a fase de análise e interpretação dos resultados, com o objetivo de extrair informações e evidências capazes de responder aos objetivos desta pesquisa.

As análises realizadas a partir do Arquivo A tiveram como finalidade caracterizar o contexto científico da Internet Quântica e Redes Quânticas. Para isso, foram investigados indicadores como a evolução temporal das publicações, os periódicos com maior volume de estudos, as principais áreas de pesquisa, os autores, instituições e países mais produtivos, além de outros aspectos relevantes para compreender o desenvolvimento científico do tema.

As análises provenientes do Arquivo B concentraram-se na interpretação da rota de conhecimento obtida por meio da rede de citações. Para facilitar sua compreensão, a rota foi classificada em três camadas, conforme recebem e fazem citações dentro da rede:

- ❑ **Camada I – Emergente:** artigos com grau de entrada zero, ou seja, que podem ainda não terem sido citados dentro da base. Representam a fronteira recente do campo, reúne os artigos localizados no topo da rota científica e representa as contribuições mais atuais e inovadoras da área;
- ❑ **Camada II – Intermediária:** artigos que recebem e também fazem citações. Formada por estudos que expandem e consolidam os fundamentos, estabelecendo conexões entre os trabalhos pioneiros e as pesquisas mais recentes;
- ❑ **Camada III – Basilar:** artigos com grau de saída zero, ou seja, que não citam nenhum outro artigo da base. São as referências fundadoras do campo, composta pelos trabalhos que estabelecem os fundamentos conceituais e científicos da Internet Quântica.

Dessa forma, a análise da cadeia de citações permite compreender a evolução do conhecimento científico e identificar as principais tendências de pesquisa em Internet Quântica e Redes Quânticas.

4.2 Experimentos

4.2.1 Análise descritiva da Conhecimento Científico sobre Internet Quântica e Redes Quânticas

Primeiro, serão analisados os dados Arquivo A, tecendo análises descritivas sobre os dados, buscando entender um contexto geral do ambiente de pesquisas sobre Internet Quântica e Redes Quânticas.

4.2.1.1 Caracterização geral da base de dados

A caracterização inicial é uma etapa fundamental para compreender a composição da base de dados. Foram coletados **6.243 documentos** publicados entre **1984** e **2025** pela base da *Web Of Science* e *Scopus*.

A Tabela 4 mostra uma base ampla em todas as dimensões: 1.172 periódicos, 7.776 instituições e 46 países. Esses números já indicam que o tema se distribui em diferentes contextos geográficos e fontes de publicação. As citações acumuladas chegam a 178.222, com um volume total de 13.795 autores.

Tabela 4 – Caracterização geral da base de dados

Indicador	Resultado
Registros	6.243
Período	1984–2025
Periódicos	1.172
Instituições	7.776
Países	46
Autores	13.795

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.1.2 Evolução temporal das publicações

A evolução anual das publicações permite observar como o interesse científico pelo tema se modificou ao longo do período analisado. Os volumes baixos entre os anos de 1980 e 1990 na Figura 6, são condizentes com uma área ainda em formação. Há oscilação entre anos consecutivos, já a partir dos anos 2010, o número de publicações por ano cresce de forma clara, mas a tendência não deixa dúvida: a quantidade dos últimos cinco anos supera o de toda a década de 2000 somada, o pico está em 2025, com 1.183 documentos. Esse crescimento demonstra a consolidação da Internet Quântica como um campo de investigação científica.

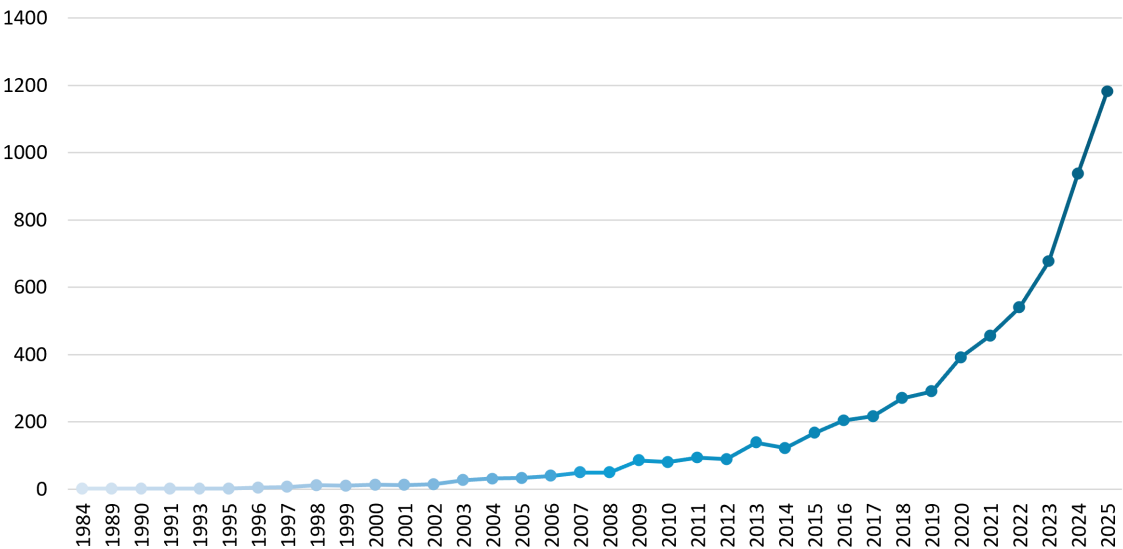


Figura 6 – Evolução temporal das publicações.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.1.3 Trabalhos mais influentes

The Quantum Internet (KIMBLE, 2008), lidera a base com 4.996 citações – quase três vezes mais que o segundo colocado (Tabela 5). A diferença é grande o suficiente para ser uma das principais referências para pesquisas posteriores sobre Internet Quântica.

Tabela 5 – Vinte trabalhos mais influentes

Pos.	Título	Ano	Qnt
1	The quantum internet (KIMBLE, 2008)	2008	4996
2	Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes in a quantum network (CIRAC et al., 1997)	1997	1920
3	Quantum communication (GISIN; THEW, 2007)	2007	1859
4	Quantum internet: A vision for the road ahead (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018)	2018	1857
5	Chiral quantum optics (LODAHL et al., 2017)	2017	1454
6	Electromagnetically induced transparency and slow light with optomechanics (SAFAVI-NAEINI et al., 2011)	2011	1346
7	Satellite-to-ground quantum key distribution (LIAO et al., 2017)	2017	1273
8	Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers (YIN et al., 2017)	2017	1144
9	Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit (TOGAN et al., 2010)	2010	1105
10	Heralded entanglement between solid-state <i>qubits</i> separated by three metres (BERNIEN et al., 2013)	2013	1011
11	Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins (AWSCHALOM et al., 2018)	2018	945
12	Dephasing-assisted transport: Quantum networks and biomolecules (PLENIO; HUELGA, 2008)	2008	931
13	Quantum algorithms revisited (CLEVE et al., 1998)	1998	922
14	Cavity-based quantum networks with single atoms and optical photons (REISERER; REMPE, 2015)	2015	848
15	Scalable photonic quantum computation through cavity-assisted interactions (DUAN; KIMBLE, 2004)	2004	820
16	Advances in quantum teleportation (PIRANDOLA et al., 2015)	2015	784
17	Quantum teleportation between light and matter (SHERSON et al., 2006)	2006	778
18	An elementary quantum network of single atoms in optical cavities (RITTER et al., 2012)	2012	757

Pos.	Título	Ano	Qnt
19	An integrated diamond nanophotonics platform for quantum-optical networks (SIPAHIGIL et al., 2016)	2016	740
20	Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator (AOKI et al., 2006)	2006	733

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Entre os dez mais citados, dois artigos de 2017 destacam-se: *Satellite-to-ground quantum key distribution* (LIAO et al., 2017) e *Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers* (YIN et al., 2017), ambos voltados à distribuição quântica por satélite. Embora relativamente recentes em comparação aos demais trabalhos da lista, essas publicações alcançaram elevado impacto científico em curto período, resultado da divulgação de avanços experimentais de grande relevância. Por esse motivo, permanecem sendo citadas e são reconhecidas como marcos da área.

4.2.1.4 Produtividade por país

A China ocupa a primeira posição, com 1950 publicações (31%) (Figura 7). Somando China, Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido, chega-se a quase 70% da base – quatro países publicam mais que os outros 42 somados.

A leitura por continentes também é possível, e mostra a estrutura geopolítica do tema. A Tabela 6 resume os blocos; o gráfico que a acompanha separa a produção acumulada por continente e a contribuição proporcional à base.

Tabela 6 – Top 20 países agrupados por continente

Continente	Países (Top 20)	Publicações	% da base
Ásia	China, Japão, Índia, Coreia do Sul, Singapura, Taiwan	2806	44,95%
Europa	Alemanha, Reino Unido, Itália, Áustria, Países Baixos, Espanha, Suíça, Dinamarca, Polônia, Rússia	2244	35,94%
América	Estados Unidos, Canadá	1559	24,97%
Oceania	Austrália	163	2,61%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Nota: as somas ultrapassam 100% porque publicações com coautoria internacional são contadas em cada país. As percentagens são sobre o total de 6.243 documentos.

A Ásia sozinha responde por quase metade da produção (44,95% se considerarmos apenas os países asiáticos listados no Top 20). O peso asiático é considerado por conta

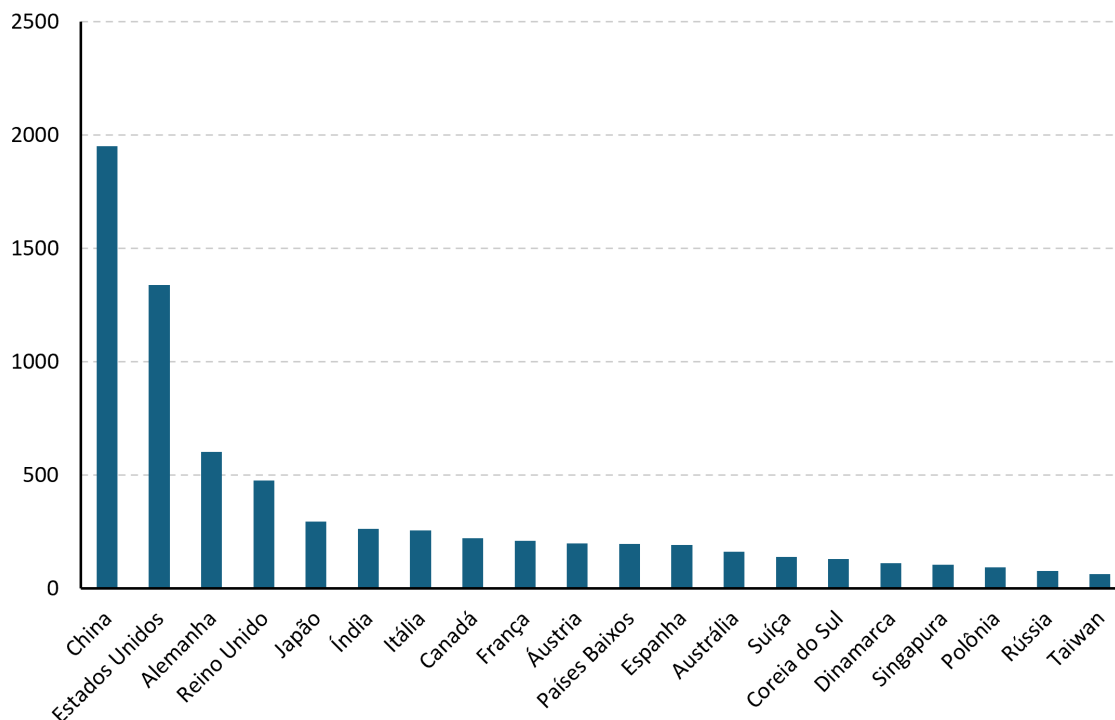


Figura 7 – Participação dos 10 países que mais publicaram.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

China, que sozinha já ultrapassa a soma de todos os países europeus do ranking. Esse dado é coerente com o que se observa em outras frentes – a *Chinese Academy of Sciences* e a *University of Science and Technology of China* também lideram o ranking institucional.

A Europa aparece em segundo lugar (35,94%), mas tem perfil distinto: nenhum país europeu domina individualmente. Os quatro maiores – Alemanha, Reino Unido, Itália e Áustria – contribuem cada um entre 3% e 10% da base. As Américas, representadas apenas por Estados Unidos e Canadá no Top 20, somam 24,97% da base. Os Estados Unidos respondem individualmente por 21,43%, quase o mesmo que a soma dos seis países europeus depois da Alemanha. A Oceania aparece apenas com a Austrália (2,61%) e a África não tem representante no Top 20.

Ressalta-se, ainda, a participação do Brasil, que apresenta frequência bastante reduzida quando comparada aos países que concentram a produção científica na área. Embora autores brasileiros estejam presentes na base analisada, sua participação é pouco expressiva diante do volume total de autores identificados. Esse resultado evidencia a baixa representatividade do Brasil no cenário da pesquisa em Internet Quântica e Redes Quânticas.

4.2.1.5 Produtividade por autores

A Figura 8 apresenta a evolução acumulada das publicações dos dez autores mais produtivos identificados na base. A representação acumulada evidencia o crescimento da conhecimento científico de cada pesquisador ao longo do período analisado, permitindo comparar de forma direta o volume total de publicações por ano.

Observa-se que Guo, G.C. lidera o ranking com 66 publicações somente em 2025. Seguido por Wang, Y. (37) e Li, J. (24). Os demais autores apresentam crescimento semelhante até aproximadamente meados da década de 2010, quando ocorre uma aceleração no conhecimento científico.

Outra característica observada é que praticamente todas as curvas apresentam crescimento mais acentuado nos anos recentes. Esse comportamento acompanha o aumento na literatura sobre Internet Quântica observada anteriormente na análise temporal das publicações mostradas na Figura 8, indicando que o número de trabalhos ocorreu tanto pela entrada de novos pesquisadores quanto pela intensificação da produtividade dos autores já consolidados.

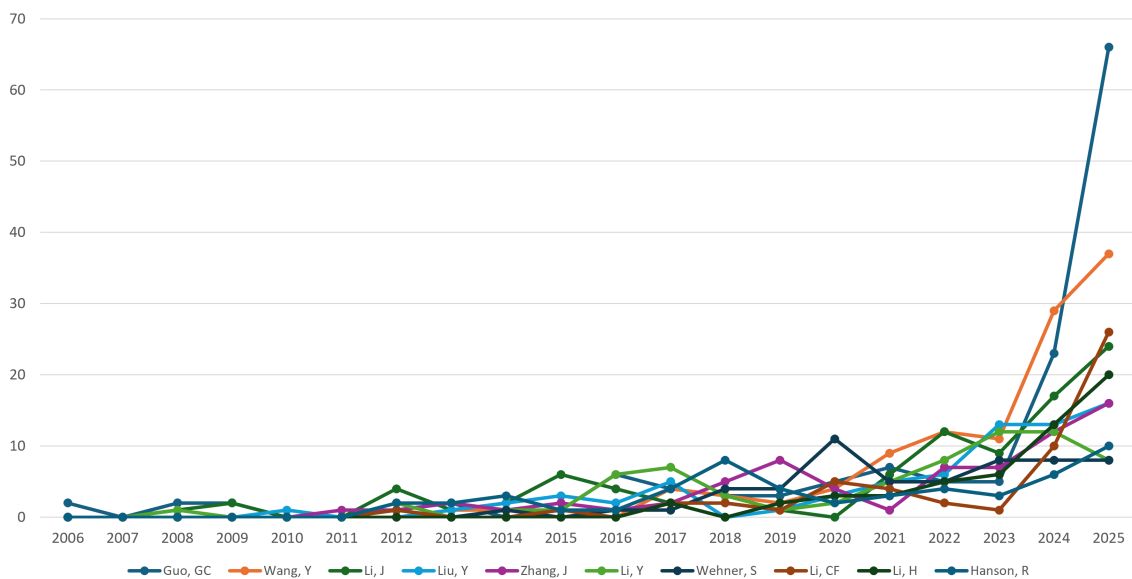


Figura 8 – Top 10 autores segundo número de publicações anualmente

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.1.6 Principais periódicos de publicação

Nessa análise é possível identificar os canais que mais publicaram trabalhos relacionados à Internet Quântica. A Tabela 7 e a Figura 9 apresentam os 20 periódicos com maior número de registros.

Tabela 7 – Top 20 periódicos de publicação

Pos.	Periódico	Publicações	% da base
1	PHYSICAL REVIEW A	458	7,34%
2	PHYSICAL REVIEW LETTERS	304	4,87%
3	PHYSICAL REVIEW APPLIED	148	2,37%
4	OPTICS EXPRESS	147	2,35%
5	QUANTUM INFORMATION PROCESSING	145	2,32%
6	SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING	141	2,26%
7	NATURE COMMUNICATIONS	133	2,13%
8	NEW JOURNAL OF PHYSICS	126	2,02%
9	SCIENTIFIC REPORTS	112	1,79%
10	NPJ QUANTUM INFORMATION	107	1,71%
11	PHYSICAL REVIEW RESEARCH	94	1,51%
12	QUANTUM SCIENCE AND TECHNOLOGY	86	1,38%
13	OPTICS INFOBASE CONFERENCE PAPERS	80	1,28%
14	ADVANCED QUANTUM TECHNOLOGIES	71	1,14%
15	PHYSICAL REVIEW A - ATOMIC, MOLECULAR, AND OPTICAL PHYSICS	65	1,04%
16	PHYSICAL REVIEW B	64	1,03%
17	NATURE	62	0,99%
18	INTERNATIONAL JOURNAL OF THEORETICAL PHYSICS	56	0,90%
19	OPTICA	56	0,90%
20	PRX QUANTUM	53	0,85%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A *PHYSICAL REVIEW A* é um periódico com o maior número de registros, com 458 publicações. Os cinco primeiros colocados somam quase 20% da base, o que mostra concentração clara nos principais periódicos da área. As vinte primeiras fontes totalizam 2.508 artigos e destaca-se a participação de periódicos publicados pela *American Physical Society* (*Physical Review A*, *Letters*, *Applied*, *Research*), o que demonstra a importância dessa editora nas pesquisas relacionadas à Física e, em particular, à Internet Quântica. Ao mesmo tempo, a presença de *Nature*, *Nature Communications* e *Scientific Reports*, indica que os avanços da área também têm alcançado visibilidade na literatura científica internacional.

Observa-se, ainda, que, embora a China apresente a maior participação entre os países e autores da base, nenhum dos 20 principais periódicos possui origem editorial chinesa. A maior parte dos registros está concentrada em periódicos de alcance internacional.

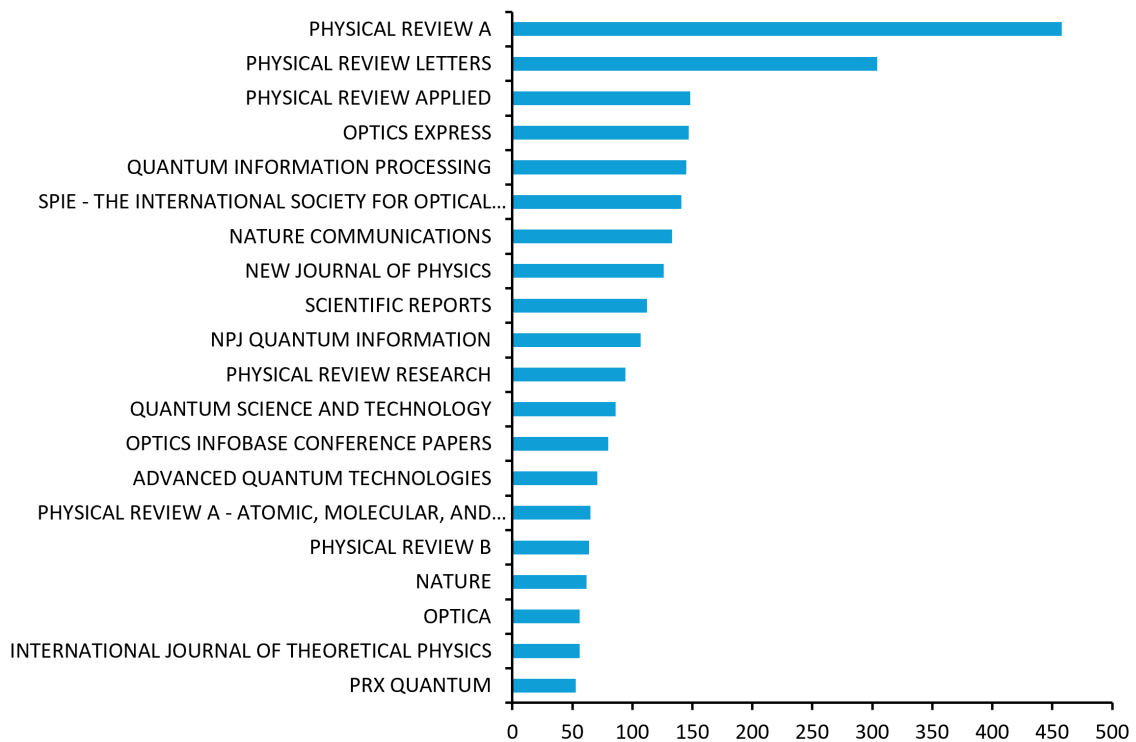


Figura 9 – Top 20 periódicos segundo o número de publicações.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

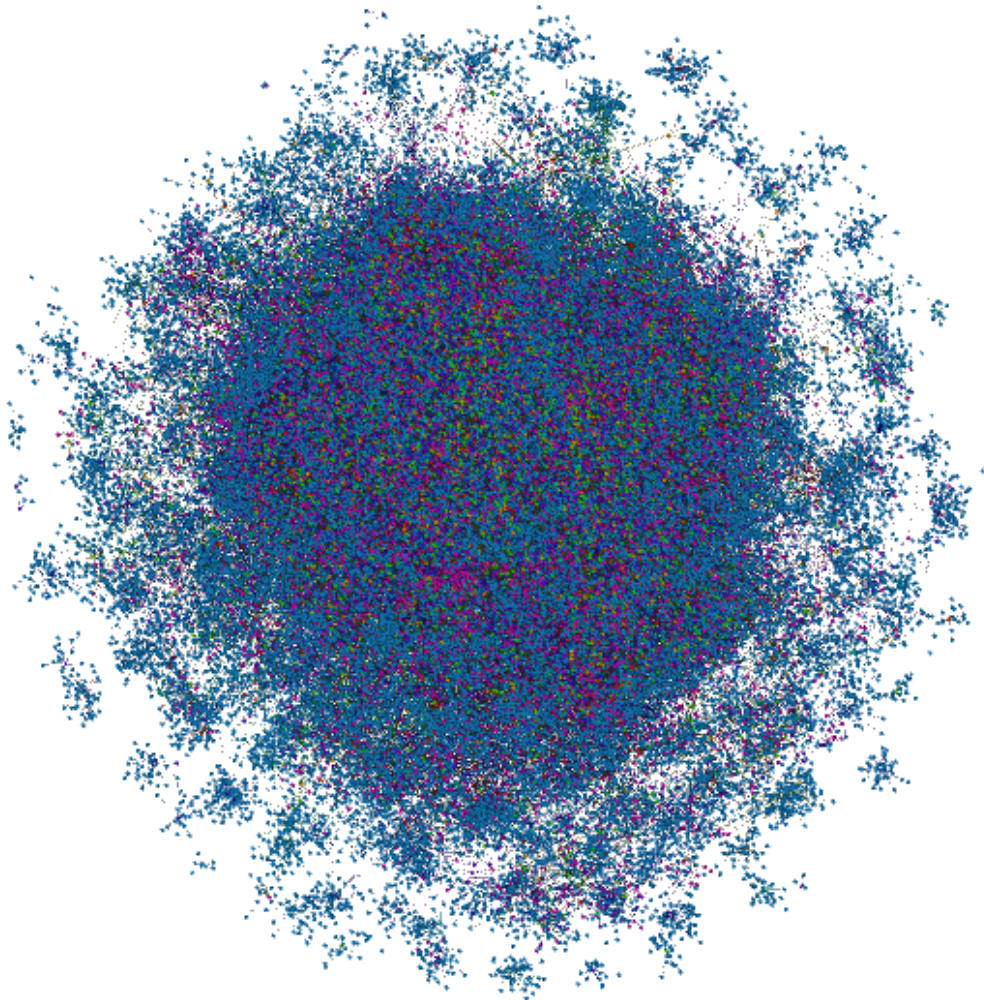
4.2.2 Análise da Rede de Citação

A rota de conhecimento é extraída a partir da estrutura inicial da rede, a rede de citação, razão pela qual esta subseção apresenta, inicialmente, a rede construída. A Figura 10 ilustra a representação visual produzida no Gephi, junto com as estatísticas que foram utilizadas.

A rede é composta por 52.437 nós e 163.601 arestas, demonstrando uma base densa de conexões. O Grau Médio de 3,12 indica que cada artigo/nó está conectado, em média, a pelo menos três outros nós. O diâmetro da rede, igual a 20, mostra a maior distância entre quaisquer dois nós, ou seja, existem pares de artigos que demandam até vinte intermediações para se conectarem. O comprimento médio do caminho, de 7,16 arestas, indica a proximidade entre os artigos: para ir de um artigo a outro, são necessários, em média, pouco mais de sete passos.

Assim, as estatísticas extraídas da rede de citação caracterizam uma rede densamente conectada, na qual as citações não se distribuem de forma isolada, mas compõem uma estrutura em que diferentes linhas de pesquisa se entrelaçam.

Figura 10 – Rede de Citação



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

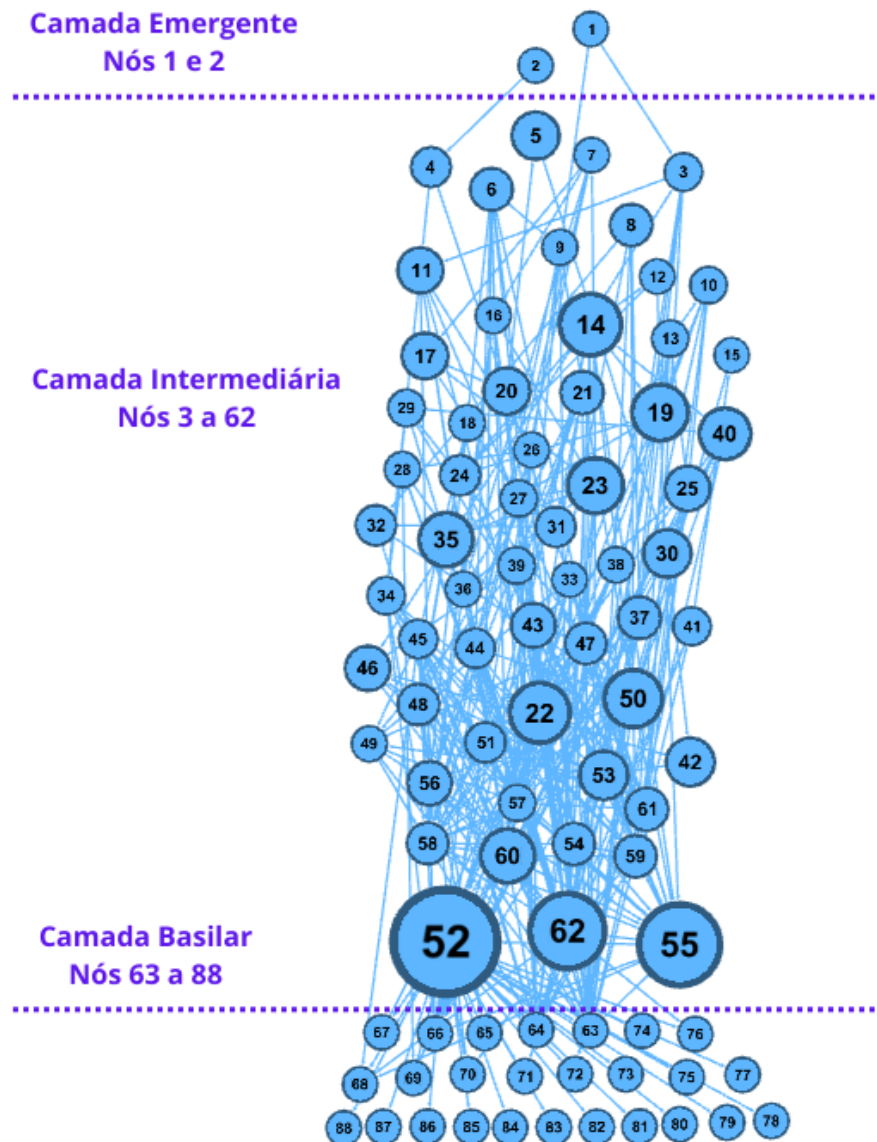
4.2.3 Análise da Rota de Conhecimento

A rota de conhecimento foi extraída da rede de citação por meio do algoritmo *SPLC* (BATAGELJ, 2003). O método atribui pesos às arestas em função do número de caminhos que as conectam, ordenando os nós de acordo com sua participação na rota.

A rota foi gerada e organizada verticalmente no *Gephi* para facilitar sua leitura e interpretação, conforme apresentado na Figura 11. Cada nó representa um artigo científico, identificado por um índice numérico, e cada aresta corresponde a uma citação entre artigos. O tamanho do nó representa a sua centralidade de intermediação (*betweenness centrality*), que é uma métrica para mensurar o poder de influência, de interferência, de intervenção do fluxo de informação daquele nó na rede, ou seja, a importância dentro da rota, de modo que artigos maiores exercem maior controle sobre o fluxo de informações ao longo do caminho.

Para melhor compreensão da rota de conhecimento, optou-se por segmentá-la em três níveis de conhecimento: Camada I - Emergente, Camada II - Intermediária e Camada III - Basilar. A Figura 11 demonstra essa divisão adotada.

Figura 11 – Rota Conhecimento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

4.2.3.1 Camada III - Basilar

Para entender a rota de conhecimento, começamos pelo final dela, nós representados na parte inferior da Figura 11, que funcionam como alicerce da base: sem eles, o restante da rota não se sustenta. Os artigos pertencentes a essa parte da rota trazem as discussões

de conceitos e técnicas mais introdutórias que foram extremamente responsáveis para a evolução da Internet Quântica, e indicam os caminhos para onde a discussão atual tem sido levada, confirmando sua importância para a estrutura do conhecimento sobre o tema desta pesquisa.

Começando a análise pela primeira linha da Tabela 8, temos a publicação que reuniu vários pesquisadores na Europa, envolvendo universidades.

Tabela 8 – Artigos pertencentes a Camada Basilar

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
Camada Basilar					
63	1998	Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication	Briegel, H.-J. (+3)	Universidade de Innsbruck (+1)	Áustria
64	2001	Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics	Duan, L.-M. (+3)	Universidade de Innsbruck (+1)	Áustria
65	1996	Mixed-state entanglement and quantum error correction	Bennett, Charles H. (+3)	IBM (+2)	Estados Unidos
66	1999	Creation of entangled states of distant atoms by interference	Cabrillo, C. (+3)	Instituto de Estructura de la Materia (+1)	Espanha
67	1995	Quantum Computations with Cold Trapped Ions	Cirac, J. I. (+1)	Universidade de Innsbruck	Áustria
68	2001	Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects	Julsgaard, Brian (+2)	Aarhus University	Dinamarca
69	2000	The Physical Implementation of Quantum Computation	DiVincenzo, David P.	IBM Research Division (+2)	Estados Unidos
70	2003	Generation of nonclassical photon pairs for scalable quantum communication with atomic ensembles	Kuzmich, A. (+6)	California Institute of Technology	Estados Unidos
71	2003	Efficient Engineering of Multiatom Entanglement through Single-Photon Detections	Duan, L.-M. (+1)	California Institute of Technology (+1)	Estados Unidos

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
72	2003	Robust Long-Distance Entanglement and a Loophole-Free Bell Test with Ions and Photons	Simon, Christoph (+1)	University of California, Santa Barbara (+1)	Estados Unidos
73	1982	Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities	Aspect, Alain (+2)	Universidade Paris-Sul (+1)	França
74	1972	Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories	Freedman, Stuart J. (+1)	Lawrence Berkeley National Laboratory (+1)	Estados Unidos
75	2000	Experimental entanglement of four particles	Sackett, C. A. (+10)	National Institute of Standards and Technology (+2)	Estados Unidos
76	2003	Atomic Memory for Correlated Photon States	Van der Wal, C. H. (+6)	Universidade Harvard (+2)	Estados Unidos
77	1999	Quantum Computation with Ions in Thermal Motion	Sorensen, Anders (+1)	Aarhus University	Dinamarca
78	1998	Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped atomic ions	Wineland, D. J. (+5)	National Institute of Standards and Technology	Estados Unidos
79	2003	State-Insensitive Cooling and Trapping of Single Atoms in an Optical Cavity	McKeever, J. (+6)	California Institute of Technology	Estados Unidos
80	2002	Coupling a Single Atomic Quantum Bit to a High Finesse Optical Cavity	Mundt, A. B. (+6)	Universidade de Innsbruck	Áustria
81	2000	Local environment can enhance fidelity of quantum teleportation	Badziag, Piotr (+3)	Malardalen University (+1)	Suécia

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
82	2001	A single ion as a nanoscopic probe of an optical field	Guthohrlein, G. R. (+4)	Max Planck Society (+1)	Alemanha
83	1993	Young's interference experiment with light scattered from two atoms	Eichmann, U. (+6)	National Institute of Standards and Technology (+1)	Estados Unidos
84	1988	Quantum jumps in atomic systems	Blatt, R (+1)	Universidade de Hamburgo	Alemanha
85	1996	Observation of Superradiant and Subradiant Spontaneous Emission of Two Trapped Ions	DeVoe, R. G. (+1)	IBM (+1)	Estados Unidos
86	2000	Generation of Spin Squeezing via Continuous Quantum Nondemolition Measurement	Kuzmich, A. (+2)	Universidade de Rochester	Nova Iorque
87	1998	Photon-Wavepackets as Flying Quantum Bits	Gheri, Klaus M. (+3)	Universidade de Innsbruck	Austria
88	2003	Speed Optimized Two-Qubit Gates with Laser Coherent Control Techniques for Ion Trap Quantum Computing	García-Ripoll, J. J. (+2)	Max Planck Institute of Quantum Optics (+1)	Alemanha

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os 26 artigos da camada basilar concentram-se entre 1972 e 2003, com mediana no ano 2000. O intervalo mais produtivo é a janela 1998–2003, composta por 21 dos 26 artigos (cerca de 81%). Há dois artigos precursores — o teste experimental dos artigos de campo identificador (ID) 73 e 74 — que constituem os pilares históricos da mecânica quântica testada em laboratório, ambos publicados na *Physical Review Letters*. O ano de maior publicação foi 2003, com 6, seguido por 2000 (4) e por 1998/2001 (3 cada). Esse caminho temporal é coerente com a função que a camada Basilar exerce na rota de conhecimento: o nível em que se consolidam os experimentos e a teoria que sustenta toda a camada subsequente. A concentração em 2003 coincide com o ponto em que as propostas de repetidores quânticos, emaranhamento multiatômico e memórias atômicas ganham validação experimental e começam a ser transpostas para a engenharia de redes.

O periódico hegemônico é a *Physical Review Letters*, com 13 artigos (50% do total). Em segundo plano aparecem a *Nature* (5), a *Physical Review A* (3) e a *Fortschritte der Physik* (2). Completam a lista *Science*, o *Journal of Research of NIST* e o *European Journal of Physics*, com uma ocorrência cada. A predominância da *Physical Review Letters* confirma que o conhecimento basilar tem fundamento em física de alto impacto, com revisão rigorosa por pares, característica típica da fronteira experimental.

Considerando o primeiro autor, observa-se elevada dispersão: 24 autores distintos em 26 artigos. Apenas Duan, L.-M. e Kuzmich, A. aparecem duas vezes cada, todos os demais contribuem com um único artigo. É uma autoria pulverizada, típica de um campo em fase inicial, em que diferentes grupos publicam, de forma independente, blocos experimentais complementares.

A camada basilar tem distribuição geográfica concentrada nos Estados Unidos (10 artigos), Alemanha (6), Áustria (5), Dinamarca (2) e, com um artigo cada, França, Holanda e China. Esse padrão revela duas estruturas complementares da física experimental clássica: de um lado, a forte presença americana, sustentada por instituições como *IBM Research*, *NIST*, *Georgia Tech*, *Caltech* e *UC Berkeley*; de outro, a consolidação de uma escola europeia centrada em *Innsbruck* (Áustria), *Hamburgo* e *Garching/Aachen* (Alemanha) e *Aarhus* (Dinamarca).

Os nós com filiação austríaca (5) são em quase todos os casos ligados à *Universidade de Innsbruck* e se agrupam em torno do grupo de *Cirac*, *Zoller* e *Briegel* — autores da proposta de repetidores quânticos (nó 63) e da comunicação quântica de longa distância com ensembles atômicos (nó 64). Os seis artigos alemães, por sua vez, distribuem-se entre a *Universität Hamburg*, a *LMU München*, o *Max-Planck-Institut für Quantenoptik* (*Garching*) e a *Universität Hamburg*, e tratam sobretudo de íons aprisionados e de saltos quânticos (nós 80, 84, 88). A Dinamarca comparece com dois artigos da Universidade de *Aarhus* (nós 68 e 77), e os Estados Unidos abrigam, além de *IBM* e *NIST*, a *Caltech* (nó 79) e a Universidade da Califórnia em *Berkeley* (nó 74). O único artigo chinês da camada (nó 81, *Badziag*) foi publicado em coautoria com a *University of Science and*

Technology of China, sinalizando o início de uma presença asiática que se ampliaria na camada Intermediária.

Em conjunto, a estrutura da camada basilar é a de uma física de centros de excelência bem definidos, com forte concentração em laboratórios europeus (sobretudo alemães e austríacos) e norte-americanos. Não há ainda participação brasileira, indiana, africana ou latino-americana — sinal de que a temática, nessa fase, era dominada por poucas potências científicas.

Do ponto de vista temático, a camada subdivide-se em quatro agrupamentos complementares.

- a) **Emaranhamento, *Bell* e não-localidade (nós 73, 74, 75)**: as demonstrações pioneiras de violação das desigualdades de *Bell* (ASPECT; GRANGIER; ROGER, 1982) (nó 73), o primeiro teste experimental controlado dessas desigualdades (FREEDMAN; CLAUSER, 1972) (nó 74) e a primeira observação de emaranhamento entre quatro partículas (SACKETT et al., 2000) (nó 75). Constituem a raiz conceitual de toda a rota.
- b) **Íons aprisionados como plataforma de *qubit* (nós 67, 69, 77, 78, 80, 82, 88)**: a proposta original para computação quântica com íons frios (CIRAC; ZOLLER, 1995) (nó 67), a análise da implementação física (DIVINCENZO, 2000) (nó 69), o protocolo de *Sorensen e Molmer* (SORENSEN; MOLMER, 1999) (nó 77), os experimentos de íons aprisionados (WINELAND et al., 1998; MUNDT et al., 2002; GUTHOHRLEIN et al., 2001) (nós 78, 80, 82) e a otimização de portas de dois *qubits* (GARCÍA-RIPOLL; ZOLLER; CIRAC, 2003) (nó 88). É a espinha dorsal de hardware da camada.
- c) **Interface átomo-fóton e conjuntos atômicos (nós 64, 66, 70, 71, 76, 79, 86)**: a comunicação de longa distância com *ensembles* atômicos (DUAN et al., 2001; DUAN; KIMBLE, 2003) (nós 64, 71), a criação *heralded* de emaranhamento atômico (CABRILLO et al., 1999) (nó 66), a geração de pares de fótons não-clássicos (KUZMICH et al., 2003) (nó 70), memórias atômicas (WAL et al., 2003; MCKEEVER et al., 2003; KUZMICH; MANDEL; BIGELOW, 2000) (nós 76, 79, 86) e o esquema de superradiância/subradiância (DEVOE; BREWER, 1996) (nó 85). É a base experimental da conversão memória-fóton.
- d) **Repetidores, correção de erros e protocolos (nós 63, 65, 68, 72, 81, 83, 84, 85, 87)**: a clássica proposta de repetidores quânticos (BRIEGEL et al., 1998) (nó 63), a correção de erros em estados mistos (BENNETT et al., 1996) (nó 65), o emaranhamento macroscópico de dois objetos (JULSGAARD; KOZHEKIN; POLZIK, 2001) (nó 68), o teste de *Bell* sem *loopholes* (SIMON; IRVINE, 2003) (nó 72), a teleportação assistida por ambiente local (BADZIAG et al., 2000) (nó 81), a interferometria de *Young* com dois átomos (EICHMANN et al., 1993) (nó 83),

os saltos quânticos (BLATT; ZOLLER, 1988) (nó 84), a superradiância (DEVOE; BREWER, 1996) (nó 85) e os pacotes de onda de fótons como *qubits* voadores (GHERI et al., 1998) (nó 87).

Em suma, a camada Basilar tem dois eixos: a demonstração de que os fenômenos quânticos podem ser controlados em laboratório e a proposição teórica dos blocos que tornarão possível uma rede — *qubits*, memórias, interfaces e protocolos de repetição. É uma camada físico-experimental, sem componente de engenharia de redes ou de aplicação, coerente com o fato de que, nessa fase, a tecnologia para integração em rede ainda não existia.

4.2.3.2 Camada II - Intermediária

A camada intermediária descreve as contribuições de pesquisas e artigos que fazem o elo entre a camada emergente e a camada basilar. Na rota de conhecimento apresentada, observamos que os nós que possuem mais peso de intermediação fazem parte da camada intermediária da rota, além disso, podemos visualizar que mais da metade da rota está centralizada nessa camada. A Tabela 9 abaixo, resume as principais informações sobre as publicações presentes no conhecimento intermediário.

Tabela 9 – Artigos pertencentes a Camada Intermediária

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
Camada II - Intermediária					
3	2023	Simulating quantum key distribution in fiber-based quantum networks	Vitullo, Dashiell LP (+5)	DEVCOM Army Research Laboratory (+1)	Estados Unidos
4	2023	The Prospect of Quantum Technologies in Space for Defence and Security	Krelina, Michal	Czech Technical University in Prague	República Tcheca
5	2016	Quantum gate learning in qubit networks: Toffoli gate without time-dependent control	Banchi, Leonardo (+2)	University College London (+2)	Reino Unido (+2)
6	2025	Quantum frequency conversion of single photons from a tin-vacancy center in diamond	Brevoord, Julia Maria (+9)	Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT (+1)	Alemanha (+1)
7	2020	Quantum State Optimization and Computational Pathway Evaluation for Gate-Model Quantum Computers	Gyongyosi, Laszlo	Budapest University of Technology and Economics (+2)	Hungria (+2)
8	2023	Fully Packaged Multichannel Cryogenic Quantum Memory Module	Starling, David J. (+15)	Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (+1)	Estados Unidos (+1)
9	2025	Large-range tuning and stabilization of the optical transition of diamond tin-vacancy centers by in-situ strain control	Brevoord, Julia M. (+12)	QuTech and Kavli Institute of Nanoscience (+2)	Países Baixos (+2)
10	2013	Photon entanglement detection by a single atom	Huwer, J (+5)	Institute of Photonic Sciences (+1)	Espanha (+1)

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
11	2021	Quantum technology for military applications	Krelina, Michal	Czech Technical University in Prague	República Tcheca
12	2024	Advanced Control Architectures for Quantum Satellite Temporal-Networking	Chiti, Francesco (+2)	Department of Information Engineering, University of Florence	Itália
13	2013	Heralded Photonic Interaction between Distant Single Ions	Schug, M. (+4)	Saarland University (+1)	Alemanha (+1)
14	2017	Diamond photonics for distributed quantum networks	Johnson, Sam (+2)	University of Oxford	Reino Unido
15	2009	Photon-Photon Entanglement with a Single Trapped Atom	Weber, B. (+6)	Photonics (United States) (+1)	Estados Unidos (+1)
16	2020	Theory of Noise-Scaled Stability Bounds and Entanglement Rate Maximization in the Quantum Internet	Gyongyosi, Laszlo (+1)	Budapest University of Technology and Economics (+2)	Hungria (+2)
17	2019	Training Optimization for Gate-Model Quantum Neural Networks	Gyongyosi, Laszlo (+1)	Budapest University of Technology and Economics (+2)	Hungria (+2)
18	2024	Quantum Internet Addressing	Cacciapuoti, Angela Sara (+2)	Quantum Internet (+1)	Itália (+1)
19	2021	Towards the Quantum Internet: Satellite Control Plane Architectures and Protocol Design	Chiti, Francesco (+3)	Department of Information Engineering, University of Florence	Itália
20	2017	Quantum generalisation of feedforward neural networks	Wan, Kwok Ho (+4)	London Institute for Mathematical Sciences (+3)	Reino Unido (+3)

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
21	2025	Review of Distributed Quantum Computing: From single QPU to High Performance Quantum Computing	Barral, David (+12)	Centro de Supercomputación de Galicia (+2)	Espanha (+2)
22	2007	Generation and transfer of single photons on a photonic crystal chip	Englund, Dirk (+4)	Stanford University	Estados Unidos
23	2020	Routing space exploration for scalable routing in the quantum Internet	Gyongyosi, Laszlo (+1)	Budapest University of Technology and Economics (+2)	Hungria (+2)
24	2022	Metropolitan Quantum-Drone Networking and Computing: A Software-Defined Perspective	Chiti, Francesco (+2)	Department of Information Engineering, University of Florence	Itália
25	2014	Experimental protocol for high-fidelity heralded photon-to-atom quantum state transfer	Kurz, Christoph (+5)	Saarland University	Alemanha
26	2025	Multiplexed entanglement of multi-emitter quantum network nodes	Ruskuc, A. (+6)	California Institute of Technology (+3)	Estados Unidos (+3)
27	2020	Optimizing High-Efficiency Quantum Memory with Quantum Machine Learning for Near-Term Quantum Devices	Gyongyosi, Laszlo (+1)	Budapest University of Technology and Economics (+2)	Hungria (+2)
28	2024	A quantum-network register assembled with optical tweezers in an optical cavity	Hartung, Lukas (+4)	Max-Planck-Institut für Quantenoptik (+1)	Alemanha (+1)
29	2022	Spectral multiplexing of telecom emitters with stable transition frequency	Ulanowski, Alexander (+2)	Max-Planck-Institut für Quantenoptik (+1)	Alemanha (+1)

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
30	1996	Quantum networks for elementary arithmetic operations	Vedral, Vlatko (+2)	University of Oxford	Reino Unido
31	2022	Single-Photon Storage in a Ground-State Vapor Cell Quantum Memory	Buser, Gianni (+4)	University of Basel (+2)	Suíça (+2)
32	2022	Field-Deployable Quantum Memory for Quantum Networking	Wang, Yang (+4)	Qunnect Inc.	Estados Unidos
33	2018	Dephasing mechanisms of diamond-based nuclear-spin memories for quantum networks	Kalb, N. (+3)	QuTech (+1)	Países Baixos (+1)
34	2023	Quantum networks with neutral atom processing nodes	Covey, Jacob P. (+2)	University of Illinois Urbana-Champaign (+4)	Estados Unidos (+4)
35	2021	Compiler Design for Distributed Quantum Computing	Ferrari, Davide (+3)	University of Parma (+2)	Itália (+2)
36	2020	Entanglement accessibility measures for the quantum Internet	Gyongyosi, Laszlo (+1)	Budapest University of Technology and Economics (+2)	Hungria (+2)
37	2024	Development of a Boston-area 50-km fiber quantum network testbed	Bersin, Eric (+24)	Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (+6)	Estados Unidos (+6)
38	2005	Theory of Control of the Spin-Photon Interface for Quantum Networks	Yao, Wang (+2)	University of California San Diego	Estados Unidos
39	2022	QuISP: a Quantum Internet Simulation Package	Satoh, Ryosuke (+10)	Keio University Shonan Fujisawa Campus (+4)	Japão (+4)
40	2020	Cavity quantum electrodynamics with color centers in diamond	Janitz, Erika (+2)	McGill University (+1)	Canadá (+1)

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
41	2010	Entanglement of spin waves among four quantum memories	Choi, K. S. (+4)	California Institute of Technology (+2)	Estados Unidos (+2)
42	2023	SimQN: A Network-Layer Simulator for the Quantum Network Investigation	Chen, Lutong (+6)	School of Cyber Science and Technology, University of Science and Technology of China (+2)	China (+2)
43	2015	Heralded Storage of a Photonic Quantum Bit in a Single Atom	Kalb, Norbert (+3)	Max Planck Institute of Quantum Optics	Alemanha
44	2024	Metropolitan-scale heralded entanglement of solid-state <i>qubits</i>	Stolk, Arian J. (+22)	QuTech and Kavli Institute of Nanoscience (+5)	Países Baixos (+5)
45	2023	Entanglement-Assisted Quantum Networks: Mechanics, Enabling Technologies, Challenges, and Research Directions	Li, Zhonghui (+9)	School of Cyber Science and Technology, University of Science and Technology of China (+3)	China (+3)
46	2021	QuNetSim: A Software Framework for Quantum Networks	Diadamo, Stephen (+3)	Technische Universität München	Alemanha
47	2016	Robust Quantum-Network Memory Using Decoherence-Protected Subspaces of Nuclear Spins	Reiserer, Andreas (+7)	QuTech (+1)	Países Baixos (+1)
48	2024	Distributed quantum computing: A survey	Caleffi, Marcello (+5)	Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni	Itália
49	2020	Designing a quantum network protocol	Kozłowski, Wojciech (+2)	Delft University of Technology	Países Baixos

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
50	2021	Quantum networks based on color centers in diamond	Ruf, Maximilian (+4)	QuTech, Delft University of Technology (+4)	Países Baixos (+4)
51	2018	Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins	Awschalom, David D. (+3)	Argonne National Laboratory (+6)	Estados Unidos (+6)
52	2004	Observation of entanglement between a single trapped atom and a single photon	Blinov, B. B. (+3)	University of Michigan	Estados Unidos
53	2021	NetSquid, a NETwork Simulator for QUantum Information using Discrete events	Coopmans, Tim (+15)	QuTech (+3)	Países Baixos (+3)
54	2024	Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom network	Knaut, C. M. (+16)	Harvard University (+2)	Estados Unidos (+2)
55	2019	A link layer protocol for quantum networks	Dahlberg, Axel (+11)	Delft University of Technology and TNO and Kavli Institute of Nanoscience Delft (+1)	Países Baixos (+1)
56	2022	Qubit teleportation between non-neighbouring nodes in a quantum network	Hermans, S. L. N. (+5)	QuTech (+2)	Países Baixos (+2)
57	2017	Entanglement distillation between solid-state quantum network nodes	Kalb, N. (+9)	QuTech, Delft University of Technology (+4)	Países Baixos (+4)
58	2018	Deterministic delivery of remote entanglement on a quantum network	Humphreys, Peter C. (+7)	QuTech (+2)	Países Baixos (+2)
59	2012	An elementary quantum network of single atoms in optical cavities	Ritter, Stephan (+9)	Max Planck Society (+1)	Alemanha (+1)

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
60	2021	Realization of a multinode quantum network of remote solid-state <i>qubits</i>	Pompili, M. (+11)	QuTech, Delft University of Technology (+1)	Países Baixos (+1)
61	2018	Quantum internet: A vision for the road ahead	Wehner, Stephanie (+2)	QuTech, Delft University of Technology (+1)	Países Baixos (+1)
62	2008	The quantum internet	Kimble, H. J.	California Institute of Technology	Estados Unidos

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O conhecimento intermediário abrange uma recorte muito mais amplo, que vai de 1996 até 2025, como foco em 2020. O conhecimento científico se concentra entre 2020–2024, que reúne 30 dos 60 artigos — metade da camada. Os anos de maior frequência são 2024 (8), 2020 e 2021 (7 cada), 2022 (6) e 2023 (5). O perfil bimodal — um pico moderno entre 2020 e 2024 e uma longa cauda que remonta à proposta visionária de Kimble (2008) — é típico de um campo em maturação acelerada após anos de teoria.

Diferentemente da camada Basilar, a camada Intermediária apresenta leque diversificado, com clara hegemonia da *Nature* (8 artigos) e da *Scientific Reports* (5). Em seguida, com 4 ocorrências cada, surgem *Physical Review Letters* e *Science* — sinal de que parte das publicações intermediárias ainda alcança periódicos de grande impacto e influência. Completam a lista *Quantum Information*, *Physical Review Applied*, *IEEE Access* e *IEEE Network* (2 cada). A presença evidente de periódicos da IEEE sinaliza a transição para a engenharia de protocolos e arquiteturas de rede, deixando para trás o escopo físico.

Em relação aos autores, observa-se que há concentração maior que na Basilar: 49 autores distintos em 60 artigos, com *Gyongyosi, L.* aparecendo em 6 publicações (10% do total) — de longe o autor mais produtivo da camada intermediária. Em seguida vêm *Chiti, F.* e *Kalb, N.* (3 cada), e *Krelina, M.* e *Brevoord, J. M.* (2 cada). A recorrência de *Gyongyosi* em roteamento, otimização de estados, maximização da taxa de emaranhamento e aprendizado de máquina quântico revela que ele atua como mais frequente em relação a teoria da Internet Quântica, sempre vinculado à *University of Southampton* (Reino Unido). Na sequência da análise, os 60 artigos distribuem-se por 12 países diferentes, com clara hegemonia da Holanda (15 artigos, 25%), seguida por Estados Unidos (13), Reino Unido (10), Alemanha (8), Itália (6), *Tchéquia* (2), China (2) e, com um artigo cada, Espanha, Suíça, Japão e Canadá. Comparada à Basilar — onde EUA e Alemanha respondiam por 62% dos artigos —, a camada II amplia apresenta uma distribuição dos artigos mais diversificada em relação à camada III: Embora a Europa permaneça predominante, observa-se uma reorganização do conjunto de conhecimento científico: Holanda, Reino Unido e Alemanha passam a concentrar 55% dos artigos, substituindo o conjunto anteriormente formado por Estados Unidos, Alemanha e Áustria. Além disso, a Itália passa a assumir maior relevância nessa camada, com seis artigos voltados principalmente às arquiteturas de comunicação via satélite e aos planos de controle da Internet Quântica.

A Holanda passa a liderar a Camada II — Intermediária graças a representatividade da *Delft University of Technology* e da *QuTech* — centro de pesquisa que concentra o esforço de integração de centros NV e SnV em diamante como nós de rede. Dos 15 artigos holandeses, 11 têm como primeiro autor *Kalb, N.*, *Hermans, S. L. N.*, *Stolk, A. J.*, *Pompili, M.*, *Wehner, S.*, *Reiserer, A.*, *Ruf, M.*, *Knaut, C. M.*, *Humphreys, P. C.*, *Dahlberg, A.* ou *Kozlowski, W.*, o que confirma que *Delft* é o centro de experimentos da Internet Quântica nesta camada. Os 13 artigos americanos distribuem-se entre *MIT*, *Caltech*, *NIST*, *Harvard*, *UIUC*, *Stanford*, *University of Chicago* e outras instituições, com

forte presença dos grupos de *Awschalom (Chicago)*, *Englund (MIT)* e *Lukin (Harvard)*. O Reino Unido, com 10 artigos, concentra-se principalmente na *University of Southampton* (sede da pesquisa de *Gyongyosi*) e no *University College London (Banchi, Wan, Vedral)*. A Alemanha, com 8 artigos, apoia-se na *Universität München*, na *Universität Hamburg* e no *Forschungszentrum Jülich*, com foco em íons aprisionados. A Itália passa a ocupar uma posição de destaque com 6 artigos centrados em Florença e Nápoles, com *Chiti, F. e Cacciapuoti, A. S.* liderando os trabalhos sobre plano de controle para satélites quânticos e endereçamento na Internet Quântica. Os dois artigos chineses (nó 45, Li, e nó 42, Chen) e os dois tchecos (nó 4 e nó 11, Krelina) sinalizam a chegada de novas referências regionais, em particular a Tchécua como centro de estudos sobre aplicações militares quânticas — o que prepara a transição para a Camada I — Emergente.

A camada Intermediária é exposta como a mais volumosa e, em consequência, a mais heterogênea. A leitura dos títulos e dos resumos permite organizar os 60 artigos em seis grandes agrupamentos.

- a) **A Internet Quântica como conceito (nós 18, 19, 24, 45, 48, 49, 55, 61, 62):** a visão prospectiva de (KIMBLE, 2008) (Nó 62), a trajetória de (WEHNER; ELKOUSS; HANSON, 2018) (Nó 61), a definição de protocolos de enlace por (DAHLBERG et al., 2019) (Nó 55), o endereçamento de (CACCIAPUOTI; ILLIANO; CALEFFI, 2024) (Nó 18), os planos de controle para satélites e drones quânticos de (CHITI et al., 2021) (Nó 19) e (CHITI; PICCHI; PIERUCCI, 2022) (Nó 24), o survey de computação distribuída de (CALEFFI et al., 2024) (Nó 48), o desenho de protocolo de (KOZLOWSKI; DAHLBERG; WEHNER, 2020) (Nó 49) e a revisão de (LI et al., 2023) (Nó 45). É o eixo que dá nome e direção à camada.
- b) **Memórias quânticas e nós de rede (nós 6, 8, 9, 14, 22, 26, 28, 31, 32, 33, 40, 43, 47, 50, 51, 54):** o trabalho de (REISERER et al., 2016) (Nó 47) sobre memórias protegidas contra decoerência, os experimentos de (KALB et al., 2015) (Nó 43) e (KALB et al., 2018) (Nó 33) e (HERMANS et al., 2022) (Nó 56) com diamante, a fotônica em diamante de (JOHNSON; DOLAN; SMITH, 2017) (Nó 14), os módulos empacotados de (STARLING et al., 2023) (Nó 8) e (RUSKUC et al., 2025) (Nó 26), a eletrodinâmica de cavidade de (JANITZ; BHASKAR; CHILDRESS, 2020) (Nó 40), o armazenamento em vapor de (BUSER et al., 2022) (Nó 31) e o emaranhamento nanofotônico em rede de telecom de (KNAUT et al., 2024) (Nó 54). É a engenharia dos elementos que efetivamente armazenam e emitem *qubits*.
- c) **Emaranhamento remoto, teletransporte e distribuição de chaves (nós 3, 10, 13, 15, 25, 41, 44, 52, 56, 58, 60):** desde o emaranhamento heralded entre íons distantes de (BLINOV et al., 2004) (Nó 52) até a realização multinodo de (POMPILI et al., 2021) (Nó 60) e o emaranhamento heralded em escala me-

tropolitana de (STOLK et al., 2024) (Nó 44). Inclui (HUMPHREYS et al., 2018) (Nó 58), (HERMANS et al., 2022) (Nó 56) e a simulação de QKD em fibra de (VITULLO et al., 2023a) (Nó 3). É o eixo operacional da camada.

- d) **Centros de cor em diamante e processamento com átomos neutros (nós 5, 14, 17, 20, 28, 34, 40, 88)**: a base teórica de (GARCÍA-RIPOLL; ZOLLER; CIRAC, 2003) (Nó 88) e (BANCHI; PANCOTTI; BOSE, 2016) (Nó 5) para aprendizado de portas quânticas em redes, a fotônica em diamante de (JOHNSON; DOLAN; SMITH, 2017) (Nó 14), a revisão de (AWSCHALOM et al., 2018) (Nó 51), os nós baseados em centros SnV de (BREVOORD et al., 2025b) (Nó 6) e (BREVOORD et al., 2025a) (Nó 9), as redes com átomos neutros de (COVEY; WEINFURTER; BERNIEN, 2023) (Nó 34) e o registrador de (HARTUNG et al., 2024) (Nó 28).
- e) **Computação quântica distribuída (nós 21, 35, 48)**: o artigo de (BARRAL et al., 2025a) (Nó 21), o compilador de (FERRARI et al., 2021) (Nó 35) e o artigo de (CALEFFI et al., 2024) (Nó 48). Representa o amadurecimento do tema: do enlace ponto a ponto à divisão de algoritmos entre QPUs remotas.
- f) **Simuladores e frameworks de protocolo (nós 39, 42, 46, 53)**: (SATO et al., 2022) (QuISP, Tóquio, 2022), (CHEN et al., 2023) (SimQN, Tsinghua, 2023), (DIADAMO et al., 2021) (QuNetSim, TUM, 2021) e (COOPMANS et al., 2021) (NetSquid, Delft, 2021). É a infraestrutura de software sem a qual os 60 artigos experimentais não poderiam ser sistematicamente comparados.

A transição entre os avanços obtidos em laboratório e sua aplicação na construção da Internet Quântica, é bem representado nessa camada. O conceito de Internet Quântica conecta seis comunidades de pesquisa com diferentes focos. As pesquisas desenvolvidas em *Delft* concentram-se em memórias quânticas baseadas em centros NV/SnV; *Southampton* destaca-se pelos estudos sobre protocolos e roteamento; *Garching* e *Hamburgo* reúnem trabalhos voltados a experimentos com íons; *Florença* concentra pesquisas sobre arquiteturas via satélite; enquanto Nápoles e Tóquio se dedicam à simulação quântica distribuída. A composição dos periódicos demonstra a integração entre diferentes áreas do conhecimento, reunindo tanto revistas voltadas à física fundamental, como *Nature*, *Science* e *Physical Review Letters*, quanto periódicos de engenharia, como *IEEE Network* e *IEEE Access*.

4.2.3.3 Camada I - Emergente

Os nós que compõe a parte de cima da rota são classificados como os mais emergentes e promissores relacionado à Internet Quântica. Isso significa que os artigos dizem respeito ao que existe de mais novo sendo desenvolvido dentro da área que este trabalho promove. A Tabela 10 apresenta os dois artigos que fazem parte do topo do conhecimento:

Tabela 10 – Artigos pertencentes à Camada Emergente

ID	Ano	Título	Autores	Filiação	País
Camada I - Emergente					
1	2023	Computational Simulation Framework for Tactical Quantum Network Applications	Vitullo, Dashiell L. P. (+4)	DEVCOM Army Research Laboratory (+4)	Estados Unidos (+4)
2	2025	Artificial intelligence and blockchain for quantum satellites and UAV-based communications: a review	Kumar, Adarsh (+8)	Mohammed VI Polytechnic University (+8)	Marrocos (+8)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os dois artigos foram publicados em 2023 (VITULLO et al., 2023b) (nó 1) e 2025 (KUMAR et al., 2025a) (nó 2), e em veículos distintos. O nó 1 foi publicado nos anais da *MILCOM*, conferência da IEEE voltada às comunicações militares, enquanto o nó 2 foi publicado na *Quantum Machine Intelligence*, periódico dedicado à interface entre computação quântica e inteligência artificial. Essa combinação evidencia a ampliação da pesquisa em Internet Quântica para aplicações estratégicas e interdisciplinares.

Os trabalhos têm como primeiros autores *Vitullo, D. L. P.* e *Kumar, A.*. Destaca-se que *Vitullo* também assina o nó 3 da Camada Intermediária, indicando a continuidade de uma linha de pesquisa sobre simulação de redes quânticas em cenários táticos. As afiliações dos autores também revelam uma mudança no perfil da pesquisa: o nó 1 está vinculado ao *DEVCOM Army Research Laboratory*, nos Estados Unidos, enquanto o nó 2 reúne pesquisadores da *Mohammed VI Polytechnic University* (Marrocos) em colaboração com instituições da Índia, Emirados Árabes Unidos, Arábia Saudita, Coreia do Sul e Nova Zelândia, ampliando a participação de novos países no conhecimento científico da área. Os nós também apontam para uma nova direção da pesquisa. *Vitullo* propõem o *QuantACT*, um framework para simulação de redes quânticas em aplicações táticas, enquanto *Kumar* analisam o uso conjunto de inteligência artificial e blockchain em comunicações quânticas baseadas em satélites e veículos aéreos não tripulados.

Em conjunto, ambos artigos indicam que a fronteira da Internet Quântica se deslocou da pesquisa em física e engenharia de protocolos para integração de sistemas com IA, blockchains e plataformas aéreas não tripuladas — em aplicações civis e militares. Esse é o principal indicador de que a rota permanece ativa e em expansão.

4.2.3.4 Considerações Finais

Encerrando a análise da rota de conhecimento, a Tabela 11 sintetiza, de forma comparativa, as principais características das três camadas que constituem o caminho do conhecimento científico sobre Internet Quântica e Redes Quânticas.

Tabela 11 – Comparação entre as camadas da rota principal de conhecimento científico

Aspecto	Camada Basilar	Camada Intermediária	Camada Emergente
Período predominante	1972–2008	2004–2025	2023–2025
Foco principal	Fundamentos da informação quântica, emaranhamento, repetidores quânticos, memórias quânticas e comunicação quântica	Arquiteturas de Internet Quântica, protocolos, simuladores, computação quântica distribuída, redes e aplicações	Integração com IA, blockchain, satélites, UAVs, segurança, aplicações militares e testes experimentais
Natureza das pesquisas	Principalmente teórica e experimental em laboratório	Consolidação de arquiteturas, protocolos e plataformas de simulação	Aplicações práticas, integração tecnológica e novas arquiteturas
Contribuição científica	Estabelece os princípios físicos e computacionais que viabilizam a Internet Quântica	Conecta os fundamentos às arquiteturas de rede e aos mecanismos de comunicação distribuída	Expande a aplicação da Internet Quântica para cenários reais e tecnologias emergentes
Tecnologias predominantes	Emaranhamento, fótons, armadilhas de íons, repetidores quânticos, memória quântica	Simulação de redes, computação distribuída, protocolos de comunicação, redes de nós quânticos	IA, blockchain, satélites quânticos, drones, redes híbridas e comunicações seguras
Maturidade científica	Consolidação dos conceitos fundamentais	Desenvolvimento e validação das arquiteturas	Expansão tecnológica e aplicações avançadas
Perspectiva evolutiva	Origem da área	Consolidação da infraestrutura da Internet Quântica	Tendências e pesquisas de fronteira

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A análise comparativa das três camadas evidencia uma evolução contínua da Internet Quântica. A **Camada Basilar** concentra os trabalhos responsáveis pela construção dos fundamentos teóricos e experimentais da área, estabelecendo conceitos como emaranhamento, repetidores quânticos, memória quântica e comunicação entre sistemas distribuídos. A **Camada Intermediária** representa a consolidação desse conhecimento, direcionando os esforços para arquiteturas de rede, protocolos de comunicação, simuladores e computação quântica distribuída. Por sua vez, a **Camada Emergente** demonstra uma mudança de foco para aplicações práticas e integração com tecnologias contemporâneas, destacando inteligência artificial, *blockchain*, comunicações via satélite, aplicações táticas e simulação computacional avançada. Em conjunto, as três camadas confirmam que a Internet Quântica é um campo em expansão, sustentado por uma infraestrutura científica consolidada e passou de uma fase conceitual para um estágio de desenvolvimento, aproximando-se de aplicações em ambientes reais e indicando as principais tendências que deverão orientar as pesquisas futuras.

Conclusão

A Internet Quântica tem se consolidado como uma das principais áreas emergentes da Ciência da Computação, reunindo pesquisas relacionadas à comunicação quântica, computação distribuída, criptografia e futuras arquiteturas de redes. Diante desse cenário, esta dissertação buscou caracterizar a evolução científica desse campo por meio da análise de sua produção bibliográfica, da estrutura de sua rede de citações e da identificação de sua rota de conhecimento.

Os resultados obtidos demonstram que a área atravessa um período de rápida expansão científica. A análise descritiva revelou crescimento contínuo da produção ao longo dos últimos anos, indicando que a Internet Quântica deixou de representar um tema apenas conceitual para consolidar-se como uma área estratégica de pesquisa. O aumento simultâneo do número de publicações, autores, periódicos e países envolvidos evidencia o amadurecimento da comunidade científica e o fortalecimento da colaboração internacional em torno do desenvolvimento das futuras Redes Quânticas. Outro aspecto importante observado refere-se à concentração do conhecimento científico em periódicos de elevado impacto da Física e da Computação Quântica. A análise dos autores mais produtivos também evidenciou a existência de grupos consolidados de pesquisa responsáveis por parcela significativa da literatura. Observou-se forte participação de pesquisadores vinculados principalmente à China, Europa e Estados Unidos, resultado compatível com os investimentos realizados por esses países em programas nacionais de tecnologias quânticas. Essa concentração científica demonstra que a corrida pelo desenvolvimento da Internet Quântica ocorre em escala internacional e envolve grandes centros de pesquisa, universidades e empresas de tecnologia.

A análise da rede de citações complementou essa caracterização ao demonstrar que o conhecimento produzido na área apresenta uma estrutura organizada em torno de trabalhos altamente influentes. Os artigos mais citados constituem a base conceitual sobre a qual novos estudos vêm sendo desenvolvidos, evidenciando que a evolução científica da Internet Quântica ocorre de maneira incremental, em que novos conhecimentos são construídos sobre contribuições anteriormente consolidadas. A identificação da rota de

conhecimento permitiu compreender essa evolução de forma ainda mais detalhada. A camada basilar revelou os trabalhos responsáveis pela construção dos fundamentos da Internet Quântica, abordando conceitos relacionados à computação quântica, comunicação quântica, distribuição de chaves e teletransporte quântico. Esses estudos estabeleceram a base teórica necessária para o desenvolvimento das pesquisas posteriores.

Na camada intermediária observou-se a consolidação da área, marcada pelo desenvolvimento de arquiteturas de Internet Quântica, protocolos de comunicação, mecanismos de distribuição de emaranhamento, repetidores quânticos e modelos de Redes Quânticas. Nesse estágio, a pesquisa deixa de concentrar-se apenas na compreensão dos fenômenos físicos e passa a discutir como construir uma infraestrutura capaz de interligar dispositivos quânticos em larga escala.

Por sua vez, a camada emergente evidencia o direcionamento atual das pesquisas. Os artigos pertencentes a essa camada demonstram que a comunidade científica passou a investigar aplicações mais complexas envolvendo inteligência artificial, *blockchain*, computação distribuída, redes multinó, redes metropolitanas, arquiteturas heterogêneas, simulação de Redes Quânticas e integração com futuras infraestruturas de comunicação, como as redes 6G. Esse resultado indica que a Internet Quântica encontra-se em processo de transição entre pesquisas experimentais e o desenvolvimento de aplicações voltadas ao uso prático.

5.1 Principais Contribuições

A principal contribuição científica desta dissertação consiste na caracterização da Internet Quântica, abrangendo tanto sua dimensão quantitativa quanto sua estrutura de evolução. Diferentemente de uma análise baseada apenas na contagem de publicações ou citações, o trabalho integrou estatísticas descritivas, análise de redes e identificação da rota de conhecimento.

Essa integração permitiu identificar não apenas os autores, países e periódicos mais relevantes, mas também os estudos que exerceram funções distintas na construção do campo. A organização da rota em camadas basilar, intermediária e emergente contribuiu para explicar como o conhecimento evoluiu dos fundamentos da comunicação quântica para arquiteturas, protocolos e experimentos de Redes Quânticas. A pesquisa permitiu identificar que a Internet Quântica introduz recursos inexistentes nas redes clássicas, especialmente a distribuição de emaranhamento e a transmissão de estados quânticos. Contudo, os resultados indicam que a ruptura não deve ser compreendida como substituição imediata da Internet atual. A tendência observada aponta para uma convivência entre infraestruturas clássicas e quânticas, com integração gradual entre ambas.

Outra contribuição relevante em termos técnicos foi a atualização do plugin SPLC utilizado no *Gephi*, o SPLC-DP para identificação das rotas de conhecimento. A ferramenta

havia permanecido sem atualização por um longo período, dificultando sua utilização nas versões recentes do programa, tornando possível executar os experimentos para grandes rede. Ampliando as possibilidades de aplicação da análise de rotas de conhecimento por outros pesquisadores interessados em compreender trajetórias científicas e tecnológicas.

Como uma das contribuições centrais deste trabalho, foi reimplementado o plugin do SPLC, nomeado SPLC-DP, uma versão atualizada do plugin capaz de trabalhar sobre redes de grande porte e muito conectadas.

O algoritmo SPLC original, proposto por Hummon e Doreian (1989), permaneceu sem atualização por mais de uma década em razão de restrições arquiteturais do Gephi e da complexidade computacional. Na prática, isso limitava o uso da ferramenta às versões legadas do software, nas quais o processamento de redes com milhares de nós tornava-se inviável, condição essa que justamente a configuração das redes de citação em áreas com forte produção recente, como a Internet Quântica (HUMMON; DOREIAN, 1989; BATAGELJ, 2003).

A reimplementação do plugin foi viabilizada pelo uso de uma ferramenta de IA, o Claude Code, que permitiram a leitura do código legado e a refatoração para uma arquitetura compatível com a versão atual do Gephi. Graças a técnicas de programação dinâmica, o SPLC-DP realiza o cálculo de caminhos em redes densamente conectadas em tempo muito inferior ao da implementação original, viabilizando a análise de redes de citação com milhares de nós — configuração encontrada, por exemplo, nessa pesquisa. O plugin está disponibilizado publicamente em repositório aberto, sob licença aberta, e pode ser instalado diretamente pelo gerenciador de plugins do Gephi a partir do seguinte endereço: <<https://github.com/moniele/SPLC-DP>>.

5.2 Trabalhos Futuros

Embora os objetivos desta pesquisa tenham sido alcançados, algumas possibilidades de continuidade podem ampliar a compreensão sobre a evolução da Internet Quântica e complementar os resultados obtidos.

Uma primeira possibilidade consiste na ampliação da etapa de validação qualitativa por meio da realização de entrevistas com um número maior de especialistas. A inclusão de pesquisadores e profissionais vinculados às áreas de Física, Computação, Redes de Computadores, Segurança da Informação e indústria poderá proporcionar diferentes perspectivas sobre os desafios tecnológicos, o estágio de maturidade da Internet Quântica e suas perspectivas de adoção.

Por fim, outra oportunidade de pesquisa refere-se à rota tectológica, a partir de análise de patentes relacionadas à Internet Quântica e às Redes Quânticas. Enquanto esta dissertação concentrou-se na evolução do conhecimento científico, a investigação de patentes poderá complementar essa análise ao revelar o estágio de desenvolvimento tecnológico e

de inovação da área.

5.3 Contribuições em Produção Bibliográfica

Sousa, Moniele & De Paulo, Alex & Silva, Flávio & Pereira, João. (2021). Caracterização das pesquisas sobre a próxima rede global de comunicação: a Internet Quântica. 7-12. 10.5753/wquantum.2021.17220.

Sousa, Moniele Pereira, João Travençolo, Bruno De Paulo, Alex. (2026). Knowledge Evolution in Quantum Internet Research: A Bibliometric and Citation Network Analysis. Manuscript submitted to International Journal of Innovation Science (Manuscript ID: IJIS-07-2026-0643).

Referências

- ABBATE, J. **Inventing the Internet**. Cambridge, MA: MIT Press, 2000.
- ABDULAZIZ, E.; AL-HUSSAINI, K.; ABDULRAZZAK, F. A review of quantum internet architecture. In: **2025 5th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA)**. [s.n.], 2025. p. 1–7. Disponível em: <10.1109/eSmarTA66764.2025.11132166>.
- AKYILDIZ, I. F.; KAK, A.; NIE, S. 6g and beyond: The future of wireless communications systems. **Computer Networks**, v. 201, p. 108570, 2022. Disponível em: <10.1016/j.comnet.2021.108570>.
- AOKI, T. et al. Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator. **Nature**, v. 443, n. 7112, p. 671–674, 2006. Disponível em: <10.1038/nature05147>.
- ARSHAD, Q. K. U. D. et al. **A Review on the Evolution of Cellular Technologies**. 2019.
- ARUTE, F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. **Nature**, v. 574, n. 7779, p. 505–510, out. 2019.
- ASPECT, A.; GRANGIER, P.; ROGER, G. Experimental realization of einstein-podolsky-rosen-bohmgedankenexperiment: A new violation of bell's inequalities. **Physical Review Letters**, v. 49, n. 2, p. 91–94, 1982. Disponível em: <10.1103/physrevlett.49.91>.
- AWSCHALOM, D. D. et al. Quantum technologies with optically interfaced solid-state spins. **Nature Photonics**, v. 12, n. 9, p. 516–527, 2018. Disponível em: <10.1038/s41566-018-0232-2>.
- _____. Development of quantum interconnects for next-generation information technologies. **Nature Photonics**, Nature Publishing Group, v. 15, n. 7, p. 516–524, 2021. Disponível em: <10.1038/s41566-021-00794-8>.
- BADZIAG, P. et al. Local environment can enhance fidelity of quantum teleportation. **Physical Review A**, v. 62, n. 1, 2000. Disponível em: <10.1103/physreva.62.012311>.
- BANCHI, L.; PANCOTTI, N.; BOSE, S. Quantum gate learning in qubit networks: Toffoli gate without time-dependent control. **npj Quantum Information**, v. 2, n. 1, 2016. Disponível em: <10.1038/npjqi.2016.19>.

BARRAL, D. et al. Review of distributed quantum computing: From single qpu to high performance quantum computing. **Computer Science Review**, v. 57, p. 100747, 2025. Disponível em: <10.1016/j.cosrev.2025.100747>.

BARRAL, L. et al. Scalability and error correction challenges in quantum computing. **Quantum Information Processing**, v. 24, n. 1, p. 1–25, 2025. Disponível em: <10.1007/s11128-025-04218-7>.

BATAGELJ, V. Efficient algorithms for citation network analysis. **arXiv preprint cs/0309023**, 2003.

BENNETT, C. H. Logical reversibility of computation. **IBM Journal of Research and Development**, v. 17, n. 6, p. 525–532, 1973. Disponível em: <10.1147/rd.176.0525>.

BENNETT, C. H.; BRASSARD, G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. **Theoretical Computer Science**, v. 560, p. 7–11, 2014.

BENNETT, C. H. et al. Mixed-state entanglement and quantum error correction. **Physical Review A**, v. 54, n. 5, p. 3824–3851, 1996. Disponível em: <10.1103/physreva.54.3824>.

BERNIEN, H. et al. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres. **Nature**, v. 497, n. 7447, p. 86–90, 2013. Disponível em: <10.1038/nature12016>.

BLATT, R.; ZOLLER, P. Quantum jumps in atomic systems. **European Journal of Physics**, v. 9, n. 4, p. 250–256, 1988. Disponível em: <10.1088/0143-0807/9/4/002>.

BLINOV, B. B. et al. Observation of entanglement between a single trapped atom and a single photon. **Nature**, v. 428, n. 6979, p. 153–157, 2004. Disponível em: <10.1038/nature02377>.

BORGATTI, S. P. et al. Network analysis in the social sciences. **Science**, v. 323, n. 5916, p. 892–895, 2009. Disponível em: <10.1126/science.1165821>.

BOUWMEESTER, D. et al. Experimental quantum teleportation. **Nature**, v. 390, n. 6660, p. 575–579, dez. 1997. Disponível em: <10.1038/37539>.

BREVOORD, J. M. et al. Quantum frequency conversion of single photons from a tin-vacancy center in diamond. **Optica Quantum**, v. 3, n. 6, p. 583, 2025. Disponível em: <10.1364/opticaq.576448>.

_____. Large-range tuning and stabilization of the optical transition of diamond tin-vacancy centers by in situ strain control. **Applied Physics Letters**, v. 126, n. 17, 2025. Disponível em: <10.1063/5.0251211>.

BRIEGEL, H. et al. Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication. **Physical Review Letters**, v. 81, n. 26, p. 5932–5935, 1998. Disponível em: <10.1103/physrevlett.81.5932>.

BROADBENT, A.; FITZSIMONS, J.; KASHEFI, E. **Universal Blind Quantum Computation**. 2009. Disponível em: <10.1109/FOCS.2009.36>.

BUSER, G. et al. Single-photon storage in a ground-state vapor cell quantum memory. **PRX Quantum**, v. 3, n. 2, 2022. Disponível em: <10.1103/prxquantum.3.020349>.

- BUSSAB, W. d. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- BUTTS, C. T. Social network analysis: A methodological introduction. **Asian Journal of Social Psychology**, v. 11, n. 1, p. 13–41, 2008. Disponível em: <10.1111/j.1467-839X.2007.00241.x>.
- CABRILLO, C. et al. Creation of entangled states of distant atoms by interference. **Physical Review A**, v. 59, n. 2, p. 1025–1033, 1999. Disponível em: <10.1103/physreva.59.1025>.
- CACCIAPUOTI, A. S.; CALEFFI, M. A quantum internet protocol suite beyond layering. **IEEE Transactions on Network Science and Engineering**, v. 13, p. 9170–9187, 2026. Disponível em: <10.1109/TNSE.2026.3679795>.
- CACCIAPUOTI, A. S.; ILLIANO, J.; CALEFFI, M. Quantum internet addressing. **IEEE Network**, v. 38, n. 1, p. 104–111, 2024. Disponível em: <10.1109/mnet.2023.3328393>.
- CALEFFI, M. et al. Distributed quantum computing: A survey. **Computer Networks**, v. 254, p. 110672, 2024. Disponível em: <10.1016/j.comnet.2024.110672>.
- CALEFFI, M.; CACCIAPUOTI, A. S. Quantum internet architecture: Unlocking quantum-native routing via quantum addressing. **IEEE Transactions on Communications**, v. 74, p. 3577–3599, 2026. Disponível em: <10.1109/TCOMM.2025.3650397>.
- CALEFFI, M.; CACCIAPUOTI, A. S.; BIANCHI, G. Quantum internet: from communication to distributed computing! In: **Proceedings of the 5th ACM International Conference on Nanoscale Computing and Communication**. New York, NY, USA: ACM, 2018. p. 1–4.
- _____. Quantum internet: from communication to distributed computing. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n. 12, p. 1835–1863, 2022. Disponível em: <10.1109/JPROC.2022.3207655>.
- CARRINGTON, P. J.; SCOTT, J.; WASSERMAN, S. (Ed.). **Models and Methods in Social Network Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. Disponível em: <10.1017/CBO9780511811398>.
- CASTELVECCHI, D. **IBM’s quantum cloud computer goes commercial**. 2017. 159–159 p.
- _____. ‘quantum internet’ demonstration in cities is most advanced yet. **Nature**, Springer Science and Business Media LLC, v. 629, n. 8013, p. 734–735, maio 2024.
- CERF, V. G.; KAHN, R. E. A protocol for packet network intercommunication. **IEEE Transactions on Communications**, v. 22, n. 5, p. 637–648, 1974. Disponível em: <10.1109/TCOM.1974.1092259>.
- CHEN, C. et al. Path knowledge discovery: a brief survey. **Journal of Information Science**, SAGE Publications, v. 40, n. 6, p. 759–774, 2014. Disponível em: <10.1177/0165551514531350>.

- CHEN, L. et al. Simqn: A network-layer simulator for the quantum network investigation. **IEEE Network**, v. 37, n. 5, p. 182–189, 2023. Disponível em: <10.1109/mnet.130.2200481>.
- CHEN, Y.-A. et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 589, n. 7841, p. 214–219, 2021. Disponível em: <10.1038/s41586-020-03093-8>.
- CHITI, F. et al. Towards the quantum internet: Satellite control plane architectures and protocol design. **Future Internet**, v. 13, n. 8, p. 196, 2021. Disponível em: <10.3390/fi13080196>.
- CHITI, F.; PICCHI, R.; PIERUCCI, L. Metropolitan quantum-drone networking and computing: A software-defined perspective. **IEEE Access**, v. 10, p. 126062–126073, 2022. Disponível em: <10.1109/access.2022.3226127>.
- CIRAC, J. I.; ZOLLER, P. Quantum computations with cold trapped ions. **Physical Review Letters**, v. 74, n. 20, p. 4091–4094, 1995. Disponível em: <10.1103/physrevlett.74.4091>.
- CIRAC, J. I. et al. Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes in a quantum network. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 78, p. 3221–3224, Apr 1997. Disponível em: <10.1103/PhysRevLett.78.3221>.
- CLARK, D. et al. **Towards the Future Internet Architecture**. 1991.
- CLEVE, R. et al. Quantum algorithms revisited. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 454, n. 1969, p. 339–354, 1998. Disponível em: <10.1098/rspa.1998.0164>.
- COATES, J. F. et al. On the future of technological forecasting. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 67, n. 1, p. 1–17, 2001. Disponível em: <10.1016/S0040-1625(00)00122-0>.
- COOPMANS, T. et al. Netsquid, a network simulator for quantum information using discrete events. **Communications Physics**, v. 4, n. 1, 2021. Disponível em: <10.1038/s42005-021-00647-8>.
- COVEY, J. P.; WEINFURTER, H.; BERNIEN, H. Quantum networks with neutral atom processing nodes. **npj Quantum Information**, v. 9, n. 1, 2023. Disponível em: <10.1038/s41534-023-00759-9>.
- CUI, Z.-B. et al. Metropolitan-scale ion-photon entanglement via a quantum network node with hybrid multiplexing enhancements. **Nature Communications**, v. 17, p. 697, 2026. Disponível em: <10.1038/s41467-025-67311-5>.
- CUOMO, D. et al. Towards a distributed quantum computing ecosystem. **IET Quantum Communication**, v. 1, n. 1, p. 3–8, 2020.
- DAHLBERG, A. et al. A link layer protocol for quantum networks. In: **Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication**. [s.n.], 2019. p. 159–173. Disponível em: <10.1145/3341302.3342070>.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology**. 2. ed. Cambridge: Academic Press, 2021.

DAMGÅRD, I. B. et al. **Secure Identification and QKD in the Bounded-Quantum-Storage Model**. 2014. 342–359 p. Disponível em: <10.1016/j.tcs.2014.09.014>.

DEBENEDICTIS, E. P. Beyond quantum supremacy. **Computer**, v. 53, n. 2, p. 91–94, fev. 2020.

DEVOE, R. G.; BREWER, R. G. Observation of superradiant and subradiant spontaneous emission of two trapped ions. **Physical Review Letters**, v. 76, n. 12, p. 2049–2052, 1996. Disponível em: <10.1103/physrevlett.76.2049>.

DIADAMO, S. et al. Qunetsim: A software framework for quantum networks. **IEEE Transactions on Quantum Engineering**, v. 2, p. 1–12, 2021. Disponível em: <10.1109/tqe.2021.3092395>.

DIVINCENZO, D. P. The physical implementation of quantum computation. **Fortschritte der Physik**, 2000. Disponível em: <10.1002/1521-3978(200009)48:9/11<771::aid-prop771>3.0.co>.

DOOLITTLE, B.; CUBEDDU, M. Quantum network simulation and emulation: A roadmap for quantum internet design. In: **2026 International Conference on Quantum Communications, Networking, and Computing (QCNC)**. [s.n.], 2026. p. 593–600. Disponível em: <10.1109/QCNC69040.2026.00099>.

DUAN, L.; KIMBLE, H. J. Efficient engineering of multiatom entanglement through single-photon detections. **Physical Review Letters**, v. 90, n. 25, 2003. Disponível em: <10.1103/physrevlett.90.253601>.

DUAN, L. et al. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics. **Nature**, v. 414, n. 6862, p. 413–418, 2001. Disponível em: <10.1038/35106500>.

DUAN, L.-M.; KIMBLE, H. J. Scalable photonic quantum computation through cavity-assisted interactions. **Physical Review Letters**, v. 92, n. 12, p. 127902, 2004. Disponível em: <10.1103/PhysRevLett.92.127902>.

EASLEY, D.; KLEINBERG, J. **Networks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World**. New York: Cambridge University Press, 2010. ISBN 9780521195331. Disponível em: <10.1017/CBO9780511761942>.

EICHMANN, U. et al. Young’s interference experiment with light scattered from two atoms. **Physical Review Letters**, v. 70, n. 16, p. 2359–2362, 1993. Disponível em: <10.1103/physrevlett.70.2359>.

EKERT, A. K. **Quantum cryptography based on Bell’s theorem**. 1991. 661–663 p.

FAVRE, G.; BRAILLY, J. The sage handbook of social network analysis, j. scott, p. j. carrington (eds.). sage publications, los-angeles, london (2011). **ALTER - European Journal of Disability Research / Revue Européenne de Recherche sur le Handicap**, v. 6-2, 06 2012. Disponível em: <10.1016/j.alter.2012.02.013>.

- FERRARI, D. et al. Compiler design for distributed quantum computing. **IEEE Transactions on Quantum Engineering**, v. 2, p. 1–20, 2021. Disponível em: <10.1109/tqe.2021.3053921>.
- FEYNMAN, R. P. **Simulating Physics with Computers**. 1982. 133–153 p.
- FONTANA, R.; NUVOLARI, A.; VERSPAGEN, B. Mapping technological trajectories as patent citation networks. an application to data communication standards. **Economics of Innovation and New Technology**, v. 18, n. 4, p. 311–336, jun. 2009.
- FREEDMAN, S. J.; CLAUSER, J. F. Experimental test of local hidden-variable theories. **Physical Review Letters**, v. 28, n. 14, p. 938–941, 1972. Disponível em: <10.1103/physrevlett.28.938>.
- GARCÍA-RIPOLL, J. J.; ZOLLER, P.; CIRAC, J. I. Speed optimized two-qubit gates with laser coherent control techniques for ion trap quantum computing. **Physical Review Letters**, v. 91, n. 15, 2003. Disponível em: <10.1103/physrevlett.91.157901>.
- GHERI, K. M. et al. Photon-wavepackets as flying quantum bits. **Fortschritte der Physik**, 1998. Disponível em: <10.1002/(sici)1521-3978(199806)46:4/5<401::aid-prop401>3.0.co>.
- GIBNEY, E. **Europe’s billion-euro quantum project takes shape**. 2017. 16–16 p. Disponível em: <10.1038/545016a>.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- GILL, S. S.; BUYYA, R. Quantum computing: Applications, challenges and future directions. **ACM Computing Surveys**, v. 56, n. 8, p. 1–39, 2024. Disponível em: <10.1145/3652500>.
- GISIN, N. et al. Quantum cryptography. **Reviews of Modern Physics**, v. 74, n. 1, p. 145–195, 2002.
- GISIN, N.; THEW, R. Quantum communication. **Nature Photonics**, v. 1, n. 3, p. 165–171, 2007. Disponível em: <10.1038/nphoton.2007.22>.
- GOTTESMAN, D.; JENNEWEIN, T.; CROKE, S. Longer-baseline telescopes using quantum repeaters. **Phys. Rev. Lett.**, v. 109, n. 7, p. 070503, ago. 2012.
- GUTHOHRLEIN, G. R. et al. A single ion as a nanoscopic probe of an optical field. **Nature**, v. 414, n. 6859, p. 49–51, 2001. Disponível em: <10.1038/35102129>.
- GYONGYOSI, L.; IMRE, S. The evolution of quantum internet architectures. **Computer Networks**, v. 245, p. 110401, 2024. Disponível em: <10.1016/j.comnet.2024.110401>.
- HALONEN, T.; ROMERO, J.; MELERO, J. **GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- HARTUNG, L. et al. A quantum-network register assembled with optical tweezers in an optical cavity. **Science**, v. 385, n. 6705, p. 179–183, 2024. Disponível em: <10.1126/science.ado6471>.

- HERMANS, S. L. N. et al. Qubit teleportation between non-neighbouring nodes in a quantum network. **Nature**, v. 605, n. 7911, p. 663–668, 2022. Disponível em: <10.1038/s41586-022-04697-y>.
- HUMMON, N. P.; DOREIAN, P. Connectivity in a citation network: The development of dna theory. **Social Networks**, v. 11, n. 1, p. 39–63, 1989. Disponível em: <10.1016/0378-8733(89)90017-8>.
- HUMPHREYS, P. C. et al. Deterministic delivery of remote entanglement on a quantum network. **Nature**, v. 558, n. 7709, p. 268–273, 2018. Disponível em: <10.1038/s41586-018-0200-5>.
- IMRE, S.; GYONGYOSI, L. **Advanced Quantum Communications: An Engineering Approach**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- JANITZ, E.; BHASKAR, M. K.; CHILDRESS, L. Cavity quantum electrodynamics with color centers in diamond. **Optica**, v. 7, n. 10, p. 1232, 2020. Disponível em: <10.1364/optica.398628>.
- JI, H.; PARK, S. Evolution of 5g and towards 6g wireless networks: A survey. **IEEE Access**, v. 12, p. 11234–11267, 2024. Disponível em: <10.1109/ACCESS.2024.3356789>.
- JOHNSON, S.; DOLAN, P. R.; SMITH, J. M. Diamond photonics for distributed quantum networks. **Progress in Quantum Electronics**, v. 55, p. 129–165, 2017. Disponível em: <10.1016/j.pquantelec.2017.05.003>.
- JULSGAARD, B.; KOZHEKIN, A.; POLZIK, E. S. Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects. **Nature**, v. 413, n. 6854, p. 400–403, 2001. Disponível em: <10.1038/35096524>.
- JUNIOR, J. F. H. et al. **Multivariate data analysis**. 8. ed. Andover: Cengage Learning, 2019.
- KALB, N. et al. Dephasing mechanisms of diamond-based nuclear-spin memories for quantum networks. **Physical Review A**, v. 97, n. 6, 2018. Disponível em: <10.1103/physreva.97.062330>.
- _____. Heralded storage of a photonic quantum bit in a single atom. **Physical Review Letters**, v. 114, n. 22, 2015. Disponível em: <10.1103/physrevlett.114.220501>.
- KIMBLE, H. J. The quantum internet. **Nature**, v. 453, n. 7198, p. 1023–1030, 2008. Disponível em: <10.1038/nature07127>.
- KNAUT, C. M. et al. Entanglement of nanophotonic quantum memory nodes in a telecom network. **Nature**, v. 629, p. 573–578, 2024. Disponível em: <10.1038/s41586-024-07252-z>.
- KÓMÁR, P. et al. **A quantum network of clocks**. 2014. 582–587 p.
- KOZLOWSKI, W.; DAHLBERG, A.; WEHNER, S. Designing a quantum network protocol. In: **Proceedings of the 16th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies**. [s.n.], 2020. p. 1–16. Disponível em: <10.1145/3386367.3431293>.

- KOZLOWSKI, W.; WEHNER, S. Architectural principles for quantum internet applications. **AVS Quantum Science**, v. 5, n. 3, 2023. Disponível em: <10.1116/5.0133923>.
- KUMAR, A. et al. Artificial intelligence and blockchain for quantum satellites and uav-based communications: a review. **Quantum Machine Intelligence**, v. 7, n. 1, 2025. Disponível em: <10.1007/s42484-025-00271-7>.
- KUMAR, V. et al. Quantum internet: Technologies, protocols, and research challenges. **International Journal of Networked and Distributed Computing**, v. 13, n. 2, p. 22, Jul 2025. ISSN 2211-7946. Disponível em: <10.1007/s44227-025-00060-5>.
- KUZMICH, A. et al. Generation of nonclassical photon pairs for scalable quantum communication with atomic ensembles. **Nature**, v. 423, n. 6941, p. 731–734, 2003. Disponível em: <10.1038/nature01714>.
- KUZMICH, A.; MANDEL, L.; BIGELOW, N. P. Generation of spin squeezing via continuous quantum nondemolition measurement. **Physical Review Letters**, v. 85, n. 8, p. 1594–1597, 2000. Disponível em: <10.1103/physrevlett.85.1594>.
- LADD, T. D. et al. Quantum computers. **Nature**, v. 464, n. 7285, p. 45–53, 2010. Disponível em: <10.1038/nature08812>.
- LAGHARI, A. et al. Quantum computing developments and emerging technologies. **IEEE Access**, v. 10, p. 118234–118252, 2022. Disponível em: <10.1109/ACCESS.2022.3211120>.
- LEINER, B. M.; CERF, V. G.; CLARK, D. D. **A Brief History of the Internet**. [s.n.], 2009. Disponível em: <10.1145/1629607.1629613>.
- LETAIEF, K. B. et al. The roadmap to 6g: Ai empowered wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 57, n. 8, p. 84–90, 2019. Disponível em: <10.1109/MCOM.2019.1900271>.
- LEVINE, D. M.; STEPHAN, D. F.; SZETELA, R. K. **Estatística: teoria e aplicações usando o Microsoft Excel**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- LI, Z. et al. Entanglement-assisted quantum networks: Mechanics, enabling technologies, challenges, and research directions. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 25, n. 4, p. 2133–2189, 2023. Disponível em: <10.1109/comst.2023.3294240>.
- LIAO, S.-K. et al. Satellite-to-ground quantum key distribution. **Nature**, v. 549, n. 7670, p. 43–47, 2017. Disponível em: <10.1038/nature23655>.
- LIMA, B. A. P. d.; PAULO, A. F. de. Rotas da produção científica das principais universidades do estado de goiás: scientific production trajectories of main universities from the state of goiás. **Revista Ibero-Americana de Ciência da Informação**, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, v. 16, n. 1, p. 108–130, 2023. ISSN 1983-5213. Disponível em: <10.26512/rici.v16.n1.2023.45315>.
- LINARES, I. M. P.; PAULO, A. F. de; PORTO, G. S. Patent-based network analysis to understand technological innovation pathways and trends. **Technology in Society**, Elsevier, v. 59, p. 101134, 2019. Disponível em: <10.1016/j.techsoc.2019.04.010>.

- LIU, J.-L. et al. Creation of memory-memory entanglement in a metropolitan quantum network. **Nature**, v. 629, p. 579–585, 2024. Disponível em: <10.1038/s41586-024-07308-0>.
- LIU, Y. et al. A text mining approach to identifying schizophrenia-related genes. **Journal of Biomedical Informatics**, Elsevier, v. 47, p. 99–106, 2014. Disponível em: <10.1016/j.jbi.2013.10.001>.
- LLEWELLYN, D. et al. Chip-to-chip quantum teleportation and multi-photon entanglement in silicon. **Nature Physics**, Nature Publishing Group, v. 16, n. 2, p. 148–153, 2020. Disponível em: <10.1038/s41567-019-0727-x>.
- LLOYD, S. et al. Infrastructure for the quantum internet. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, v. 34, n. 5, p. 9–20, out. 2004.
- LODAHL, P. et al. Chiral quantum optics. **Nature**, v. 541, n. 7638, p. 473–480, 2017. Disponível em: <10.1038/nature21037>.
- LVOVSKY, A. I.; SANDERS, B. C.; TITTEL, W. Optical quantum memory. **Nat. Photonics**, v. 3, n. 12, p. 706–714, dez. 2009.
- MAHAPATRA, N. et al. Quantum cryptography for 6g and quantum internet infrastructure. In: **2026 7th International Conference on Computational Intelligence and Networks (CINE)**. [s.n.], 2026. p. 1–6. Disponível em: <10.1109/CINE68769.2026.11503001>.
- MARILL, T.; ROBERTS, L. G. **Toward a cooperative network of time-shared computers**. 1966. Disponível em: <10.1145/1464291.1464336>.
- MCKEEVER, J. et al. State-insensitive cooling and trapping of single atoms in an optical cavity. **Physical Review Letters**, v. 90, n. 13, 2003. Disponível em: <10.1103/physrevlett.90.133602>.
- METER, R. V.; DEVITT, S. J. **The Path to Scalable Distributed Quantum Computing**. 2016. 31–42 p.
- MOORE, G. E. **Cramming more components onto integrated circuits**, Reprinted from **Electronics**, volume 38, number 8, April 19, 1965, pp.114 ff. 2006. 33–35 p. Disponível em: <10.1109/N-SSC.2006.4785860>.
- MUNDT, A. B. et al. Coupling a single atomic quantum bit to a high finesse optical cavity. **Physical Review Letters**, v. 89, n. 10, 2002. Disponível em: <10.1103/physrevlett.89.103001>.
- MURALIDHARAN, S. et al. Quantum repeaters and quantum internet: recent advances and challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 24, n. 4, p. 1953–1980, 2022. Disponível em: <10.1109/COMST.2022.3156875>.
- NEWMAN, M. E. J. **Networks: An Introduction**. Oxford: Oxford University Press, 2010. ISBN 9780199206650. Disponível em: <10.5555/1809753>.
- NIELSEN, M. A.; CHUANG, I. L. **Quantum Computation and Quantum Information**. 10th anniversary edition. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

- NOFER, M. et al. The future of quantum computing. **Business & Information Systems Engineering**, v. 65, n. 2, p. 157–168, 2023. Disponível em: <10.1007/s12599-023-00788-9>.
- NORBERG, A. L.; O'NEILL, J. E. **Transforming Computer Technology: Information Processing for the Pentagon, 1962-1986**. [S.l.]: Johns Hopkins University Press, 2000.
- NORTHUP, T. E.; BLATT, R. **Quantum information transfer using photons**. 2014. 356–363 p. Disponível em: <10.1038/nphoton.2014.53>.
- PAULO, A. F. d.; PAULO, A. F. de; PORTO, G. S. **Solar energy technologies and open innovation: A study based on bibliometric and social network analysis**. 2017. 228–238 p. Disponível em: <10.1016/j.enpol.2017.06.007>.
- PAULO, A. F. de; BRAMBILLA, G. F. Artificial intelligence and decision-making: a bibliometric study based on the Scopus. **Journal of Information & Knowledge Management**, World Scientific, Singapore, v. 24, n. 4, p. 2550035, 2025. ISSN 1793-6926. Disponível em: <10.1142/S0219649225500352>.
- PAULO, A. F. de; CALVET, H. Evolution of scientific knowledge on the internet of things and smart homes. **Journal of Technology Management & Innovation**, Universidad Alberto Hurtado, Santiago, Chile, v. 17, n. 4, p. 3–13, 2022. ISSN 0718-2724. Disponível em: <10.4067/S0718-27242022000400003>.
- PAULO, A. F. de; LIMA, B. A. P. Análise sobre o desenvolvimento científico: um estudo baseado em rotas de conhecimento. **Brazilian Journal of Information Science: research trends**, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Marília, v. 16, p. e02151, 2022. ISSN 1981-1640. Disponível em: <10.36311/1981-1640.2022.v16.e02151>.
- PAULO, A. F. de; PAIXÃO, N. E. d. Panorama da pesquisa científica e tecnológica numa perspectiva regional: overview of scientific and technological research from a regional perspective. **Perspectivas em Gestão & Conhecimento**, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, v. 15, n. 2, p. 134–158, 2025. ISSN 2236-417X. Disponível em: <10.22478/ufpb.2236-417X.2025v15n2.69463>.
- PAULO, A. F. de; PORTO, G. S. Evolution of collaborative networks of solar energy applied technologies. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 204, p. 310–320, 2018. Disponível em: <10.1016/j.jclepro.2018.08.344>.
- PICANCO-CASTRO, V. et al. Emerging car t cell therapies: clinical landscape and patent technological routes. **Human vaccines & immunotherapeutics**, Taylor & Francis, v. 16, n. 6, p. 1424–1433, 2020.
- PIRANDOLA, S. et al. Advances in quantum teleportation. **Nature Photonics**, v. 9, n. 10, p. 641–652, 2015. Disponível em: <10.1038/nphoton.2015.154>.
- _____. Advances in quantum cryptography. **Advances in Optics and Photonics**, v. 12, n. 4, p. 1012–1236, 2020.
- PITTALUGA, M. et al. Long-distance coherent quantum communications in deployed telecom networks. **Nature**, v. 640, p. 911–917, 2025. Disponível em: <10.1038/s41586-025-08801-w>.

PLENIO, M. B.; HUELGA, S. F. Dephasing-assisted transport: Quantum networks and biomolecules. **New Journal of Physics**, v. 10, n. 11, p. 113019, 2008. Disponível em: <10.1088/1367-2630/10/11/113019>.

POMPILI, M. et al. Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits. **Science**, v. 372, n. 6539, p. 259–264, 2021. Disponível em: <10.1126/science.abg1919>.

_____. Experimental demonstration of entanglement delivery using a quantum network stack. **npj Quantum Information**, v. 8, n. 1, p. 121, 2022. Disponível em: <10.1038/s41534-022-00631-2>.

PORTER, A. L.; CUNNINGHAM, S. W. **Tech Mining: Exploiting New Technologies for Competitive Advantage**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 9780471475678.

PRESKILL, J. Quantum computing in the nisq era and beyond. **Quantum**, v. 2, p. 79, 2018. Disponível em: <10.22331/q-2018-08-06-79>.

RAPPAPORT, T. S. et al. Wireless communications and applications above 100 ghz: Opportunities and challenges for 6g and beyond. **IEEE Access**, v. 7, p. 78729–78757, 2019. Disponível em: <10.1109/ACCESS.2019.2921522>.

REISERER, A. et al. Robust quantum-network memory using decoherence-protected subspaces of nuclear spins. **Physical Review X**, v. 6, n. 2, 2016. Disponível em: <10.1103/physrevx.6.021040>.

REISERER, A.; REMPE, G. Cavity-based quantum networks with single atoms and optical photons. **Reviews of Modern Physics**, v. 87, n. 4, p. 1379–1418, 2015. Disponível em: <10.1103/RevModPhys.87.1379>.

RIETSCHKE, R. et al. Quantum computing. **Electronic Markets**, v. 32, n. 4, p. 1957–1979, 2022. Disponível em: <10.1007/s12525-022-00570-9>.

RITTER, S. et al. An elementary quantum network of single atoms in optical cavities. **Nature**, v. 484, n. 7393, p. 195–200, 2012. Disponível em: <10.1038/nature11023>.

RUSKUC, A. et al. Multiplexed entanglement of multi-emitter quantum network nodes. **Nature**, v. 639, n. 8053, p. 54–59, 2025. Disponível em: <10.1038/s41586-024-08537-z>.

SAAD, W.; BENNIS, M.; CHEN, M. A vision of 6g wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. **IEEE Network**, IEEE, v. 34, n. 3, p. 134–142, 2020. Disponível em: <10.1109/MNET.001.1900287>.

SACKETT, C. A. et al. Experimental entanglement of four particles. **Nature**, v. 404, n. 6775, p. 256–259, 2000. Disponível em: <10.1038/35005011>.

SAFAVI-NAEINI, A. H. et al. Electromagnetically induced transparency and slow light with optomechanics. **Nature**, v. 472, n. 7341, p. 69–73, 2011. Disponível em: <10.1038/nature09933>.

SANGOUARD, N. et al. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics. **Reviews of Modern Physics**, American Physical Society, v. 83, n. 1, p. 33–80, 2011. Disponível em: <10.1103/RevModPhys.83.33>.

SANTHI, K. R. et al. **Goals of true broad band's wireless next wave (4G-5G)**. 2003.

SATOH, R. et al. Quisp: a quantum internet simulation package. In: **2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)**. [s.n.], 2022. p. 353–364. Disponível em: <10.1109/qce53715.2022.00056>.

SHAFI, M. et al. 5g-advanced: Evolution toward 6g. **IEEE Communications Magazine**, v. 62, n. 1, p. 16–23, 2024. Disponível em: <10.1109/MCOM.001.2300214>.

SHERSON, J. F. et al. Quantum teleportation between light and matter. **Nature**, v. 443, n. 7111, p. 557–560, 2006. Disponível em: <10.1038/nature05136>.

SHOR, P. W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. **SIAM Review**, v. 41, n. 2, p. 303–332, 1999. Disponível em: <10.1137/S0036144598347011>.

SIMON, C.; IRVINE, W. T. M. Robust long-distance entanglement and a loophole-free bell test with ions and photons. **Physical Review Letters**, v. 91, n. 11, 2003. Disponível em: <10.1103/physrevlett.91.110405>.

SIPAHIGIL, A. et al. An integrated diamond nanophotonics platform for quantum-optical networks. **Science**, v. 354, n. 6314, p. 847–850, 2016. Disponível em: <10.1126/science.aah6875>.

SORENSEN, A.; MOLMER, K. Quantum computation with ions in thermal motion. **Physical Review Letters**, v. 82, n. 9, p. 1971–1974, 1999. Disponível em: <10.1103/physrevlett.82.1971>.

STARLING, D. J. et al. Fully packaged multichannel cryogenic quantum memory module. **Physical Review Applied**, v. 19, n. 6, 2023. Disponível em: <10.1103/physrevapplied.19.064028>.

STOLK, A. J. et al. Metropolitan-scale heralded entanglement of solid-state qubits. **Science Advances**, v. 10, n. 44, 2024. Disponível em: <10.1126/sciadv.adp6442>.

STRINATI, E. C. et al. 6g: The next frontier. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 18, n. 1, p. 42–50, 2023. Disponível em: <10.1109/MVT.2022.3229632>.

STROZZI, F.; GARAGIOLA, E.; TRUCCO, P. Analysing the attractiveness, availability and accessibility of healthcare providers via social network analysis (SNA). **Decis. Support Syst.**, v. 120, p. 25–37, maio 2019. Disponível em: <10.1016/j.dss.2019.03.007>.

TATARIA, H. et al. 6g wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 7, p. 1166–1199, 2021. Disponível em: <10.1109/JPROC.2021.3061701>.

TOGAN, E. et al. Quantum entanglement between an optical photon and a solid-state spin qubit. **Nature**, v. 466, n. 7307, p. 730–734, 2010. Disponível em: <10.1038/nature09256>.

- UPAMA, M. B. et al. A review on quantum computing and communication. **International Journal of Communication Systems**, v. 35, n. 15, p. e5305, 2022. Disponível em: <10.1002/dac.5305>.
- USAI, A. et al. Knowledge discovery out of text data: a systematic review via text mining. **Journal of Knowledge Management**, Emerald Publishing, v. 22, n. 7, p. 1419–1445, 2018. Disponível em: <10.1108/JKM-11-2017-0517>.
- VALLS, V.; PROMPONAS, P.; TASSIULAS, L. A brief introduction to quantum network control. **IEEE Communications Magazine**, v. 62, n. 10, p. 48–53, 2024. Disponível em: <10.1109/MCOM.008.2300855>.
- VERSPAGEN, B. Mapping technological trajectories as patent citation networks: A study on the history of fuel cell research. **Advances in Complex Systems**, v. 10, n. 1, p. 93–115, 2007. Disponível em: <10.1142/S0219525907000875>.
- VITULLO, D. L. et al. Simulating quantum key distribution in fiber-based quantum networks. **The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology**, v. 21, n. 4, p. 463–486, 2023. Disponível em: <10.1177/15485129231154929>.
- VITULLO, D. L. P. et al. Computational simulation framework for tactical quantum network applications. In: **MILCOM 2023 - 2023 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)**. [s.n.], 2023. p. 100–102. Disponível em: <10.1109/milcom58377.2023.10356337>.
- WAL, C. H. van der et al. Atomic memory for correlated photon states. **Science**, v. 301, n. 5630, p. 196–200, 2003. Disponível em: <10.1126/science.1085946>.
- WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social Network Analysis: Methods and Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. Disponível em: <10.1017/CBO9780511815471>.
- WEHNER, S.; ELKOUSS, D.; HANSON, R. Quantum internet: A vision for the road ahead. **Science**, v. 362, n. 6412, p. eaam9288, 2018. Disponível em: <10.1126/science.aam9288>.
- WINELAND, D. et al. Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped atomic ions. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 103, n. 3, p. 259, 1998. Disponível em: <10.6028/jres.103.019>.
- XU, F. et al. Secure quantum key distribution with realistic devices. **Reviews of Modern Physics**, v. 92, n. 2, p. 025002, 2022. Disponível em: <10.1103/RevModPhys.92.025002>.
- YIN, J. et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. **Science**, v. 356, n. 6343, p. 1140–1144, 2017. Disponível em: <10.1126/science.aan3211>.
- YOSHIDA, D.; HORIKIRI, T. Multiplexed quantum repeaters based on single-photon interference with mild stabilization. **Communications Physics**, v. 7, n. 1, p. 367, Nov 2024. ISSN 2399-3650. Disponível em: <10.1038/s42005-024-01849-6>.
- YU, Y. et al. Entanglement of two quantum memories via fibres over dozens of kilometres. **Nature**, v. 578, n. 7794, p. 240–245, 2020. Disponível em: <10.1038/s41586-020-1976-7>.

ZUPIC, I.; CATER, T. Bibliometric methods in management and organization. **Organizational Research Methods**, v. 18, n. 3, p. 429–472, 2015. Disponível em: <10.1177/1094428114562629>.