

Texto n. 55

Textos para Discussão
ISSN 2447-8210

**INTERNET QUÂNTICA: o
estado da arte**

Gabriel Kenji Faustino Sasaki

Rodrigo Franklin Frogeri

Ana Amélia Furtado de Oliveira

**Grupo
Educatonal**

INTERNET QUÂNTICA: o estado da arte

Gabriel Kenji Faustino Sasaki¹

Rodrigo Franklin Frogeri²

Ana Amélia Furtado de Oliveira³

RESUMO

A Internet Quântica representa a próxima etapa evolutiva nas comunicações globais, permitindo a transferência instantânea de dados por meio do fenômeno do entrelaçamento quântico. Devido à sua natureza emergente, este estudo tem como objetivo realizar uma apresentação do estado da arte do tema Internet Quântica. Para alcançar esse objetivo, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) combinada com a aplicação de leis bibliométricas. A RSL resultou na identificação e análise de 512 estudos relevantes sobre o assunto. Esses dados foram submetidos a técnicas bibliométricas e análise lexical. Os resultados revelaram um crescimento significativo na produção científica relacionada à Internet Quântica nos últimos anos, com um aumento expressivo nos três anos mais recentes, especialmente em países europeus e asiáticos. Além disso, constatou-se que a editora científica Nature é responsável pelo maior número de publicações sobre o tema. Entre as bibliotecas digitais, destaca-se o IEEE Xplore Digital Library como a que possui o maior número de artigos indexados. Em termos de autoria, Laszlo Gyongyosi, pesquisador associado da Universidade de Tecnologia e Economia de Budapeste, é o autor mais prolífico sobre o assunto. Notavelmente, a análise revelou uma ausência de publicações em periódicos nacionais e de pesquisadores brasileiros sobre a temática da Internet Quântica.

Palavras-chave: Comunicação Quântica. Estado da arte. Rede Quântica. Revisão Sistemática da Literatura.

¹ Graduado em Sistemas de Informação pelo Centro Universitário de Sul de Minas (UNIS-MG) - gabriel.sasaki@alunos.unis.edu.br

² Doutor em Sistemas de Informação e Gestão do Conhecimento. Professor do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS - rodrigo.frogeri@professor.unis.edu.br

³ Professora do Centro Universitário do Sul de Minas. Mestre e doutora em Estudos Linguísticos - ana.furtado@professor.unis.edu.br

QUANTUM INTERNET: the state of the art

ABSTRACT

Quantum Internet represents the next evolutionary step in global communications, enabling instant data transfer through the phenomenon of quantum entanglement. Due to its emergent nature, this study aims to present the state of the art in the field of Quantum Internet. To achieve this objective, a Systematic Literature Review (SLR) combined with the application of bibliometric laws was conducted. The SLR resulted in the identification and analysis of 512 relevant studies on the subject. These data were subjected to bibliometric techniques and lexical analysis. The results revealed a significant growth in scientific production related to Quantum Internet in recent years, with a substantial increase in the last three years, particularly in European and Asian countries. Additionally, it was found that the scientific publisher Nature is responsible for the highest number of publications on the topic. Among digital libraries, the IEEE Xplore Digital Library stands out as having the largest number of indexed articles. In terms of authorship, Laszlo Gyongyosi, an associate researcher at the Budapest University of Technology and Economics, is the most prolific author on the subject. Notably, the analysis revealed a lack of publications in national journals and by Brazilian researchers on the topic of Quantum Internet.

Keywords: *Quantum Communication. State of the art. Quantum Network. Systematic Literature Review.*

1 INTRODUÇÃO

A Internet Quântica representa um avanço significativo nas comunicações globais (JAWAID, 2022). Enquanto atualmente os dados são transmitidos à velocidade da luz, a implementação da internet quântica possibilitará transferências instantâneas de dados devido ao fenômeno do entrelaçamento quântico (ZAIDI et al., 2022). Esse entrelaçamento permite que duas partículas apresentem reações idênticas, mesmo quando separadas por distâncias consideráveis (ARANTES, 2018). Ao aplicar esse conceito à transferência de dados, será possível enviar e receber informações simultaneamente, ultrapassando em muito a velocidade convencional de transmissão, proporcionada pela luz.

A "nova internet", conhecida como Internet Quântica, não apenas oferece velocidade aprimorada na transmissão de dados, mas também promete maior segurança. Isso ocorre devido ao envio dos dados em pares de fótons criptografados e ao uso de chaves quânticas (ONODY, 2021). A aplicação dessa internet seria semelhante à infraestrutura atual, abrangendo tanto o uso residencial quanto o empresarial, em todos os cenários onde a rede mundial de computadores é utilizada. A comunicação terrestre seria realizada por meio de fibras ópticas e repetidores, que criptografam, descriptografam e retransmitem o sinal. No entanto, essa estrutura requer um número considerável de repetidores para funcionar adequadamente. Uma alternativa seria enviar as chaves quânticas através de satélites para bases terrestres, eliminando assim a necessidade de repetidores (ONODY, 2021).

Contudo, o tema Internet Quântica, apesar de fazer partes das discussões no meio acadêmico, ainda se apresenta incipiente. Devido a essa incipiência, este estudo tem como objetivo apresentar o estado da arte do tema Internet Quântica. Para alcançar o objetivo proposto foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) em conjunto com a aplicação de Leis Bibliométricas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Internet Quântica

A infraestrutura atual da internet consiste em uma extensa rede de redes de computadores. Essas redes permitem a comunicação entre computadores residenciais ou empresariais, seja diretamente por meio de um roteador central ou através de subredes. O roteador central, por sua vez, conecta-se aos servidores dos provedores de internet, responsáveis por interligar essas redes residenciais/empresariais a outras redes por meio de outros provedores, facilitando a transferência de dados entre elas através do conjunto de protocolos TCP/IP (TANENBAUM; FEAMSTER, 2021).

Atualmente, os dados são transmitidos por meio de pulsos elétricos, utilizando fios de cobre, como pares trançados ou cabos coaxiais. Também é possível transmitir dados por meio de sinais de rádio, micro-ondas, infravermelho ou satélites artificiais. Além disso, a transmissão óptica, utilizando fibras ópticas, é uma opção

que oferece uma velocidade superior em relação às outras mencionadas (MOSHARRAF; FOROUZAN, 2013). Cada método de transmissão apresenta vantagens e desvantagens, dependendo do uso e do ambiente de instalação.

Em um cenário de comunicação de dados de alta velocidade, uma das abordagens mais inovadoras e promissoras é a comunicação quântica, que envolve o envio e recebimento de dados por meio de chaves quânticas (JAWAID, 2022). Esse tipo de comunicação baseia-se no entrelaçamento quântico, um fenômeno da física quântica em que duas partículas estão tão intrinsecamente ligadas que se comportam como uma única partícula - qualquer mudança em uma partícula é instantaneamente refletida na outra, independentemente da distância entre elas (HORODECKI, 2007). Isso permite uma comunicação imediata, ultrapassando a velocidade da luz. O fenômeno do entrelaçamento quântico foi inicialmente teorizado pelos físicos Einstein, Podolsky, Rosen e Schrödinger em 1932 e é reconhecido como um aspecto intrigante da mecânica quântica (HORODECKI, 2007).

Nas últimas três décadas, houve um progresso significativo na área da Comunicação Quântica, com muitas descobertas relacionadas a algoritmos quânticos para criptografia de chaves públicas (KIMBLE, 2008). Compreendendo o conceito do entrelaçamento quântico e o avanço da comunicação quântica, a criação de uma internet quântica, na qual os dados seriam transmitidos instantaneamente entre as partes envolvidas (cliente/servidor, emissor e receptor), é uma tendência evolutiva na forma de comunicação de dados digitais (ZAIDI et al., 2022).

Na Internet Quântica, os pares de fótons poderiam ser enviados por meio de fibras ópticas, mas isso poderia representar um problema de segurança, já que seriam necessários muitos repetidores que poderiam ser vulneráveis a ataques (SATOH et al., 2021). Uma alternativa em estudo é a transmissão de fótons entrelaçados por meio de satélites de comunicação quântica. Em 2020, foi realizado com sucesso o envio de fótons do satélite chinês Micius para duas cidades chinesas, com uma distância de 1120 km entre elas, sem a necessidade de repetidores (ONODY, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Para que uma RSL seja considerada confiável, Webster e Watson (2002) sugerem

que as principais bases de dados científicas e os principais periódicos sejam consultados. Assim, as bases de dados científicas que indexam os principais periódicos foram consultados, conforme Tabela 1.

As consultas foram realizadas no mês de agosto de 2022. Foram adotados como critério inclusão publicações relacionadas a artigos, conferências, livros e revistas científicas por serem formas oficiais de publicação. Como critério de exclusão, adotou-se a duplicidade de resultados em mais de uma base de dados. Não houve distinção com relação ao ano de publicação, ou seja, todos os resultados encontrados foram usados como base desde que atendendo aos critérios de inclusão.

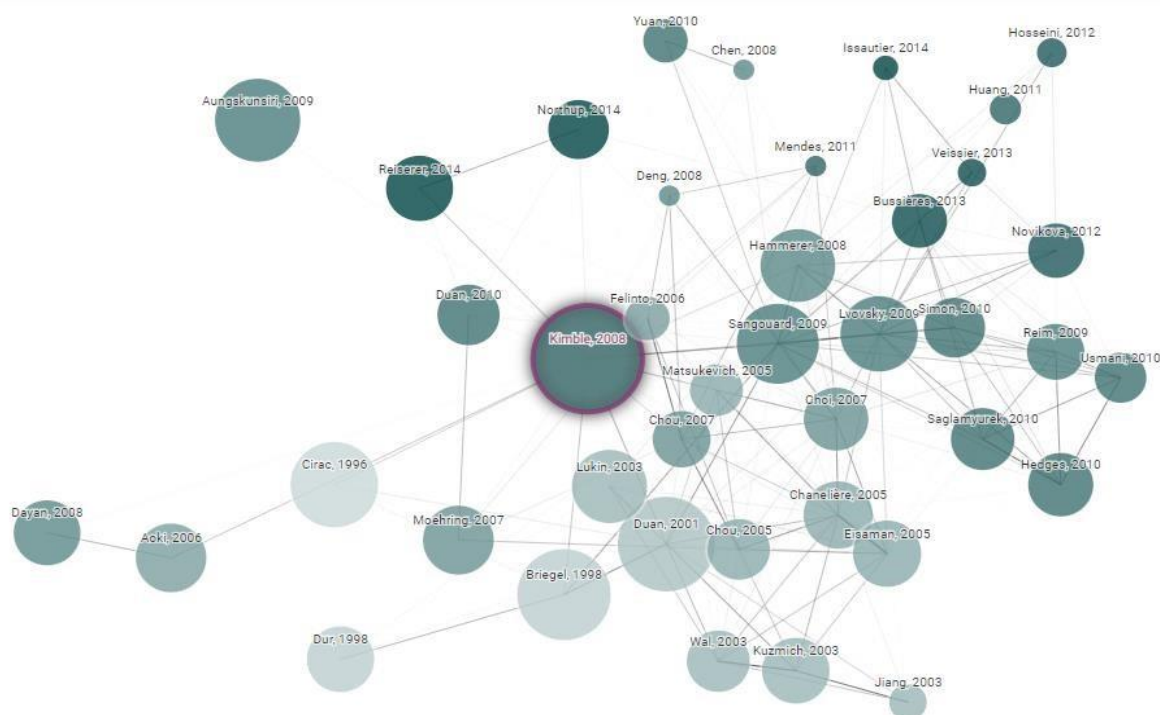
Tabela 1. Revisão nas bases de dados acadêmicas

Base de dados	String de busca	Resultados	Critério de exclusão	Critério de inclusão
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("quantum internet")	299	29	270
Web Of Science	"quantum internet" (Tópico)	176	0	176
IEEE Xplore	("Document Title":"quantum internet") OR ("Abstract":"quantum internet") OR ("Author Keywords":"quantum internet")	77	11	66
Total:		552	40	512

Fonte: Desenvolvida pelos autores (2022).

Após a identificação dos estudos em três das principais bases de dados científicas conforme supracitado, buscou-se a identificação de estudos seminais e derivados que se alinham com o estudo aqui apresentado. Para tanto, usou-se como base o estudo de Kimble (2008) na plataforma ConnectedPapers. A escolha foi feita, pois esta publicação apresenta um alto número de citações acerca do tema em análise. A plataforma Connected Papers (<https://www.connectedpapers.com/>) é uma ferramenta visual que ajuda cientistas e pesquisadores a encontrar e explorar trabalhos relevantes em seus campos de pesquisa (EITAN; SMOLYANSKY; HARPAZ, 2021). Por meio da plataforma Connected Papers foi gerado o gráfico de associações, conforme Figura 1.

Figura 1 – Grafo de associações da plataforma ConnectedPapers



Fonte: Desenvolvida via plataforma ConnectedPapers.

A Figura 1 apresenta as associações do estudo de Kimble (2008) a outros estudos da literatura. A partir dos estudos citados é criado o grafo de co-citações e acoplamento bibliográfico (EITAN et al., 2021), sugerindo que os principais estudos (mais citados) estão na rede de relações do grafo. A seguir ainda por meio da plataforma ConnectedPapers, são exibidos os estudos sugeridos como seminiais de acordo com o trabalho de Kimble (2008) - Tabela 2.

Tabela 2. Estudos seminais de Kimble (2008)

Título	Autor Principal	Ano	Número de Citações	Referências no Gráfico
<i>Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency</i>	Lukin	2000	1137	17
<i>Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses</i>	L. Hau	2001	1723	16
<i>Single-photon generation from stored excitation in an atomic ensemble.</i>	H. Kimble	2004	188	15
<i>Storage of light in atomic vapor.</i>	M. Lukin	2000	1489	15
<i>Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects</i>	E. Polzik	2001	837	15
<i>Generation of paired photons with controllable waveforms.</i>	S. Harris	2005	283	14
<i>Entanglement of a photon and a collective atomic excitation.</i>	A. Kuzmich	2005	143	14
<i>Experimental demonstration of quantum memory for light</i>	E. Polzik	2004	612	14
<i>Deterministic and storable single-photon source based on a quantum memory.</i>	Jian-Wei Pan	2006	97	13
<i>Stopped light with storage times greater than one second using electromagnetically induced transparency in a solid.</i>	N. Manson	2005	399	13

Fonte: Desenvolvida via plataforma ConnectedPapers.

A Tabela 2 apresenta os estudos com alto número de citações e que são estudos seminais dentro da temática central do documento base publicado por Kimble (2008).

Na Tabela 3, são apresentados os estudos derivados, em outras palavras, são apresentados os estudos com relação próxima a publicação de Kimble (2008) de acordo com a plataforma ConnectedPapers.

Tabela 3. Estudos derivados de Kimble (2008)

Título	Autor Principal	Ano	Número de citações	Referências no gráfico
<i>Quantum memories: emerging applications and recent advances</i>	B. Sussman	2015	261	17

<i>Exploring storage capability of a solid-state quantum memory for light</i>	A. Tiranov	2016	2	16
<i>Strong atom-light interactions along nanostructures: Transition from free-space to nanophotonic interfaces</i>	A. Goban	2015	4	16
<i>Slow and Stored Light Under Conditions of Electromagnetically Induced Transparency and Four Wave Mixing In An Atomic Vapor</i>	N. Phillips	2011	2	16
<i>Controlled Rephasing of Single Collective Spin Excitations in a Cold Atomic Quantum Memory.</i>	H. de Riedmatten	2015	23	16
<i>Quantum Internet—Applications, Functionalities, Enabling Technologies, Challenges, and Research Directions</i>	M. Magarini	2021	9	15
<i>Storage and manipulation of optical information using gradient echo memory in warm vapours and cold ensembles</i>	B. Sparkes	2013	4	15
<i>Optical quantum memory based on electromagnetically induced transparency</i>	Xiao Tang	2017	49	15
<i>A waveguide frequency converter connecting rubidium-based quantum memories to the telecom C-band.</i>	H. de Riedmatten	2014	82	14
<i>Stockage d'impulsions lumineuses dans l'hélium métastable à température ambiante</i>	Marie-Aude Maynard	2016	1	14

Fonte: Desenvolvida via plataforma ConnectedPapers.

Com os principais estudos identificados nas três principais bases de dados, foi utilizado o software de gestão de referências bibliográficas Mendeley (<https://www.mendeley.com/>) para indexação dos estudos selecionados. Na sequência foi utilizada a aplicação Rayyan (<https://rayyan.ai/>) para a identificação de dados bibliométricos das 512 publicações. Rayyan é uma aplicação gratuita e online que auxilia pesquisadores com revisões sistemáticas de literatura (JOHNSON; PHILLIPS, 2018).

A bibliometria é o termo usado para representar a aplicação de métodos matemáticos na elaboração de indicadores sobre a evolução na informação científica (PRITCHARD; WITTIG, 1981). Com a análise bibliométrica é possível observar a produção científica dos autores, áreas de conhecimento, instituições de ensino ou países (FROGERI et al., 2022). As três leis da bibliometria que foram usadas para a produção deste trabalho são: (i) Lei de Lotka (1926) - esta relacionada aos autores e seu número de contribuições - a Lei de Lotka é fundamentada no princípio de que poucos pesquisadores publicam muito e muitos publicam pouco; (ii) Lei de Bradford ou lei de dispersão (1934) - esta lei estima a

relevância de um periódico em uma determinada área de conhecimento; sugere-se que os periódicos com maior o número de publicações sobre um determinado assunto ou sobre determinada área tem maior relevância dentro do cenário em que está inserido; e (iii) Lei de Zipf (1949) - esta lei sugere que em um texto suficientemente longo, as palavras mais usadas indicam o assunto central daquele documento (FROGERI et al., 2022).

4 ANÁLISES E RESULTADOS

As análises e resultados foram divididos em dois momentos. No primeiro momento são apresentadas discussões acerca dos estudos seminais que envolvem a Internet Quântica e num segundo momento as análises bibliométricas.

4.1 Estudos seminais em Internet Quântica

Num primeiro momento das análises será apresentada uma breve discussão acerca dos 20 estudos listados nas tabelas do ConnectedPapers (Tabelas 2 e 3). Para esta discussão, foram lidos os resumos (*abstracts*) das publicações e apresentados os objetivos e principais resultados/conclusões. Os artigos foram ordenados pela ordem alfabética dos títulos das publicações, tanto para os estudos seminais quanto para os estudos derivados de Kimble (2008).

Na publicação “*Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency*”, Fleischhauer e Lukin (2000), identificaram excitações acopladas de forma estável de luz e matéria e discutem possíveis aplicações desta técnica de controle coerente reversível.

Na publicação “*Deterministic and storable single-photon source based on a quantum memory*”, Chen, Shuai, Chen, Yu-Ao e Strassel (2006), discutem sobre como uma fonte de fóton única ocorre com um conjunto atômico frio. Os autores chegam a conclusão de que essa fonte de fóton único é adequada para a futura realização em larga escala de comunicação quântica e computação quântica óptica linear.

O trabalho “*Entanglement of a photon and a collective atomic excitation*”, publicado pelos autores Matsukevich, Chanelière, Bhattacharya (2005), descreve

uma nova abordagem experimental para o emaranhamento probabilístico átomo-fóton (sinal) e concluem que tempos de coerência atômica que excedem vários microssegundos são alcançados desligando todos os campos de captura - incluindo o campo magnético quadrupolo da armadilha magneto-óptica - e zerando o campo magnético ambiente residual.

No estudo "*Experimental demonstration of quantum memory for light*", publicado pelos autores Julsgaard, Sherson, Cirac (2004), é proposto um protocolo para uma transferência de alta fidelidade de um estado quântico de luz preparado independentemente para um estado quântico atômico baseado em conjuntos atômicos. Os autores chegam a conclusão de que a gravação de um estado quântico de luz fornecido externamente na memória quântica atômica é alcançada com 70% de fidelidade, significativamente maior do que o limite para a gravação clássica, e que o armazenamento quântico de luz é obtido em três etapas. Primeiro, a interação do pulso de entrada e um campo de emaranhamento com átomos de césio polarizados por *spin*. Segundo, medição subsequente da luz transmitida; e terceiro, *feedback* para os átomos usando um pulso magnético de radiofrequência condicionado ao resultado da medição e, por fim, que a densidade dos estados registrados é 33% maior do que a melhor gravação clássica de luz em átomos, com uma vida útil da memória quântica de até 4 milissegundos.

O estudo "*Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects*" dos autores Julsgaard, Kozhekin e Polzik (2001), demonstra experimentalmente o emaranhamento de dois objetos macroscópicos. O estudo conclui que o emaranhamento é gerado por meio da interação das amostras com um pulso de luz, que realiza uma medição de Bell não local nos *spins* coletivos das amostras. Os autores acreditam que o emaranhamento robusto e duradouro de objetos materiais demonstrados no estudo seja útil no processamento de informações quânticas, incluindo o teletransporte de estados quânticos da matéria e memória quântica.

A publicação "*Generation of paired photons with controllable waveforms*", dos autores Balić, Braje, Kolchin (2005), descreve experimentos acerca da geração de fótons pareados contrapropagantes com tempos de coerência de cerca de 50 ns e formas de onda que são controláveis em um nível rudimentar. Usando lasers cw, transparência induzida eletromagneticamente e átomos frios de 87Rb , os autores

geraram fótons emparelhados em fibras ópticas monomodo opostas a uma taxa de aproximadamente 12.000 pares por segundo.

A publicação "*Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses*", dos autores Liu, Chien, Dutton e Behroozi (2001), discute sobre a transparência eletromagneticamente induzida como um efeito de interferência quântica que permite a propagação da luz através de um meio atômico opaco. O estudo também apresenta um modelo teórico que revela que o sistema é auto-ajustável para minimizar a perda dissipativa durante as operações de 'leitura' e 'escrita'. Por fim, sugere-se a aplicação desse fenômeno para o processamento de informações quânticas.

Os autores Chou, Polyakov, Kuzmich e Kimble (2004) elaboraram o artigo intitulado "*Singlephoton generation from stored excitation in an atomic ensemble*", onde é discutido sobre a geração de fótons únicos a partir de um conjunto de átomos de Cs frios através do protocolo de Duan et al. (2001).

No artigo "*Stopped light with storage times greater than one second using electromagnetically induced transparency in a solid*", publicado pelos autores Longdell, Fraival e Sellars (2005), é relatada a demonstração de armazenamento de luz por tempos superiores a um segundo em Y₂SiO₅ dopado com praseodímio usando transparência induzida eletromagneticamente. Os autores chegaram a conclusão de que a eficiência do armazenamento foi baixa devido à baixa espessura óptica da amostra, como é discutido ao longo do artigo, essa deficiência deve ser fácil de corrigir.

Por fim, o estudo "*Storage of light in atomic vapor*", dos autores Phillips, Fleischhauer, Mair, Walsworth, e Lukin, (2000), apresenta um experimento no qual um pulso de luz é efetivamente desacelerado e preso em um vapor de átomos de Rb, armazenado por um período de tempo controlado e então liberado sob demanda.

A partir deste ponto são apresentados os estudos da Tabela 3. Estes estudos são pesquisas de campo ou trabalhos recentes e relevantes que possuem certa relação ao trabalho de Kimble(2008).

O estudo "*A waveguide frequency converter connecting rubidiumbased quantum memories to the telecom C-band*", dos autores Albrecht, Farrera, e Fernandez Gonzalvo (2014). apresenta uma interface quântica fotônica de estado

sólido de ruído ultrabaixo adequada para conectar memórias quânticas baseadas em conjuntos atômicos à rede de fibra de telecomunicações. Os autores converteram fótons únicos anunciados em 780 nm de uma memória quântica baseada em rubídio para o comprimento de onda de telecomunicações de 1.552 nm, mostrando correlações não clássicas significativas entre o fóton convertido e o sinal de arauto.

O segundo estudo é intitulado “*Controlled Rephasing of Single Collective Spin Excitations in a Cold Atomic Quantum Memory*” e foi publicado pelos autores Albrecht, Farrera e Heinze (2015). Neste estudo, os autores buscam demonstrar o controle ativo de defasagem e refasagem não homogênea para excitações de *spin* atômicas coletivas únicas (ondas de *spin*) criadas por espalhamento. Os autores demonstram que o controle da defasagem não homogênea permite a criação de ondas de *spin* separadas no tempo em um único *ensemble* seguida de uma leitura seletiva no tempo. Este é um passo importante para a implementação de um nó repetidor quântico temporalmente multiplexado funcional.

O estudo “*Exploring storage capability of a solid-state quantum memory for light*”, de Tiranov (2016), é uma tese de doutorado que inclui uma série de experimentos explorando o potencial do uso de cristais dopados com íons de terras raras como uma interface quântica luz-matéria usando diferentes estados quânticos de luz como recurso de sonda. Como resultados dos experimentos, foi constatado que o armazenamento de um estado de luz hiper emaranhado compatível com a comunicação quântica de longa distância. O estudo demonstrou o potencial de uso de uma memória quântica para técnicas de purificação quântica. Para explorar a capacidade de multiplexação temporal de pentes de frequência atômica em conjuntos atômicos, realiza-se o armazenamento multimodo temporal de estado de luz emaranhado de vários fótons. Essa capacidade multimodo temporal, juntamente com as novas técnicas teóricas desenvolvidas, permite apresentar o armazenamento de mais de um bit de emaranhamento (ebit) usando estados de fótons emaranhados multi-fotônicos e multidimensionais.

O estudo “*Optical quantum memory based on electromagnetically induced transparency*”, dos autores Ma, Slattery, Tang e Xiao (2017) discute as principais tecnologias para implementação de memória quântica baseada em EIT (*Electromagnetically Induced Transparency*) e revisam marcos importantes, desde a primeira demonstração experimental até aplicações atuais em sistemas de

informação quântica. O trabalho também fornece detalhes do princípio físico e da teoria da memória quântica com base especificamente na EIT.

No estudo “*Quantum Internet - Applications, Functionalities, Enabling Technologies, Challenges, and Research Directions*”, os autores Singh, Dev e Siljak (2021), pesquisam funcionalidades, tecnologias, aplicativos e desafios abertos de internet quântica para ajudar os leitores a obter uma compreensão básica da infraestrutura necessária para o desenvolvimento de uma Internet quântica global.

O estudo “*Quantum memories: emerging applications and recent advances*”, dos autores Heshami, England e Humphreys (2015), apresenta a descrição de algumas das aplicações emergentes de memórias quânticas em processamento óptico de sinais, computação quântica e óptica não linear. Os autores também revisam desenvolvimentos experimentais e teóricos recentes e seus impactos em tecnologias quânticas fotônicas mais avançadas baseadas em memórias quânticas.

Phillips (2011) demonstrou experimentalmente a eficácia de dois protocolos para produzir a melhor eficiência de memória possível em uma determinada densidade atômica no artigo “*Slow And Stored Light Under Conditions Of Electromagnetically Induced Transparency And Four Wave Mixing In An Atomic Vapor*”. O autor apresenta os resultados de investigações experimentais e teóricas da interação FWM-EIT sob condições de onda contínua (cw), luz lenta e luz armazenada. O estudo fornece evidências que indicam que, enquanto um campo Stokes é gerado na recuperação do campo de sinal, qualquer informação originalmente codificada em um campo Stokes semeado não é preservada independentemente durante o processo de armazenamento.

No estudo “*Stockage d'impulsions lumineuses dans l'hélium métastable à température ambiante*”, o autor Maynard (2016), discute a necessidade de sincronizar as diferentes etapas da informação quântica e dos protocolos de comunicação. Os resultados experimentais obtidos estão de acordo com as simulações numéricas das equações completas de Maxwell-Bloch do sistema e demonstram a existência de uma fase adicional adquirida pelo pulso restaurado em configuração dessintonizada. Esta fase é explicada pela propagação do feixe de prova em um meio dispersivo. Numa segunda parte, o estudo destaca experimentalmente, no mesmo sistema, uma nova forma de armazenamento baseada no fenômeno de *Coherent Population Oscillations* (CPO), por natureza mais robusta a efeitos defasantes que a TIE. As simulações numéricas permitem

analisar com mais precisão os mecanismos em funcionamento em uma memória CPO e, em particular, a influência da fase relativa entre o sinal e os feixes de acoplamento nas eficiências de armazenamento.

O estudo “*Storage and manipulation of optical information using gradient echo memory in warm vapours and cold ensembles*”, do autor Sparkes (2013), se concentra em estender o esquema de memória de eco gradiente (GEM - *Gradient Echo Memory*), que se mostra muito promissor devido às altas eficiências alcançadas (87%). O GEM também tem sido usado para demonstrar compressão temporal e alongamento de pulsos, bem como a capacidade de resequenciar arbitrariamente informações armazenadas e a interferência de pulsos inicialmente separados no tempo. O autor demonstra a natureza silenciosa do armazenamento GEM em uma célula de vapor quente para provar que a saída da memória é a melhor cópia possível da entrada permitida pela mecânica quântica.

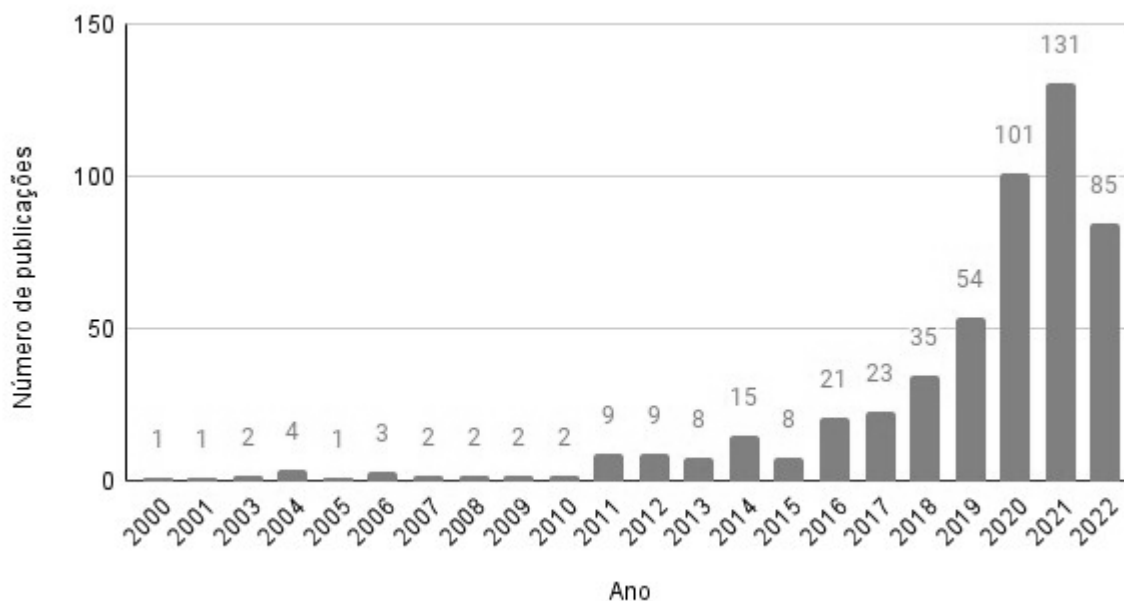
Por fim, o estudo de Goban (2015), intitulado “*Strong atom-light interactions along nanostructures: Transition from free-space to nanophotonic interfaces*”, apresenta uma investigação experimental de três sistemas diferentes, desde sistemas convencionais a sistemas bastante exóticos, conjuntos atômicos de espaço livre, nanofibras ópticas e guias de ondas de cristal fotônico. Primeiro, o estudo demonstra o emaranhamento quadripartido induzido por medição entre quatro memórias quânticas. O segundo demonstra a implementação de uma armadilha de nanofibra compensada e insensível ao estado. Por fim, chega a sistemas mais exóticos baseados em dispositivos de cristal fotônico. O autor implementou um circuito óptico integrado com um guia de ondas de cristal fotônico capaz de capturar e interfacear átomos com fótons guiados e observamos o efeito coletivo, superradiância, mediado pelos fótons guiados. Esses avanços fornecem uma capacidade importante para interações de luz-matéria projetadas, permitindo explorações de novos transportes quânticos e fenômenos quânticos de muitos corpos.

Pode-se observar que nos estudos seminais de Kimble (2008), os autores, em sua maioria, buscam formas de transportar a informação por meios quânticos, mas não necessariamente falam sobre uma rede quântica. Assim, acredita-se que esses estudos podem ser considerados uma base para fundamentar discussões mais profundas acerca do conceito de Internet quântica.

4.2. Análises Bibliométricas

As análises bibliométricas permitiram identificar 85 publicações até o mês de agosto de 2022, sendo que o ano com mais publicações foi o de 2021 com 131 publicações, seguido pelo ano de 2020 com 101 publicações. Ao se analisar o Gráfico 1, observa-se que o interesse pelo tema vem crescendo nos últimos 7 anos se comparado aos anos anteriores.

Gráfico 1. Número de publicações por ano



Fonte: Desenvolvido pelos autores (2022).

Sobre os tipos de publicação identificados em análise, 404 são artigos de periódicos científicos, um livro, 102 estudos de eventos científicos e 5 são de capítulos de livros. Os periódicos com maior número de publicações sobre Internet Quântica foram os seguintes (Tabela 5).

Tabela 5. Periódicos com maior número de publicações

Título do periódico	Total de publicações
SCIENTIFIC REPORTS	15
PHYSICAL REVIEW A	12
QUANTUM SCIENCE AND TECHNOLOGY	10
QUANTUM INFORMATION PROCESSING	9
COMMUNICATIONS PHYSICS	8
IEEE Transactions on Quantum Engineering	8
NATURE PHOTONICS	8
NATURE	6
NPJ QUANTUM INFORMATION	6
NEW JOURNAL OF PHYSICS	5
PRX QUANTUM	4
IEEE Access	4
OPTICS EXPRESS	4
NATURE COMMUNICATIONS	4
IEEE ACCESS	4
IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS	3
ENTROPY	3
IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS	3
IEEE NETWORK	3
ACTA PHYSICA SINICA	3
IEEE Network	3
IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics	3
IEEE Transactions on Communications	3
QUANTUM	3
Artificial Intelligence and Quantum Computing for Advanced Wireless Networks	2
IEEE Communications Surveys & Tutorials	2
IEEE PHOTONICS JOURNAL	2
IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS	2
IEEE Spectrum	2
SCIENCE ADVANCES	2

Fonte: Desenvolvida pelos autores (2022).

Observou-se que, dentre os periódicos listados na Tabela 5, as revistas científicas “*Scientific Reports* - <https://www.nature.com/srep/>”, a “*Nature Communications* - <https://www.nature.com/ncomms/>” e a “*Nature Photonics* - <https://www.nature.com/nphoton/>”, que são subcategorias dentro da revista “*Nature* - <https://www.nature.com/>”, somam 33 publicações.

Assim, sugere-se que a editora *Nature* publica a maior quantidade de estudos sobre o tema “Internet Quântica”. O indexador de periódicos científicos com mais resultados é o *IEEE Xplore Digital Library*. Somando-se os resultados das subcategorias *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, *IEEE Access*, *IEEE Network*, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, *IEEE Transactions on Communications*, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *IEEE Photonics Journal* e *IEEE Spectrum*, subcategorias dentro do *IEEE Xplore Digital Library*, tem-se 42 publicações no total. Destarte, sugere-se que o *IEEE Xplore* é o principal indexador de artigos científicos sobre Internet quântica.

Não foram observadas publicações sobre a Internet quântica em periódicos científicos brasileiros durante a nossa pesquisa. Mesmo que a RSL tenha sido realizada apenas pelo termo em inglês “*Quantum Internet*”, não identificar publicações em periódicos nacionais bilíngues com indexação nas bases de dados pesquisadas, sugere-se falta de interesse por parte dos pesquisadores brasileiros ou dos próprios periódicos científicos nacionais pelo tema.

A seguir, apresenta-se a lista dos autores com o maior número de publicações sobre o tema e seus respectivos países de vínculo - Tabela 6.

Tabela 6. Autores mais prolíficos

Nome do autor principal do estudo	Total de publicações	País
Gyongyosi, L.	20	Hungria
Imre, S.	17	Hungria
Wehner, S.	9	Holanda
A. S. Cacciapuoti	8	Itália
M. Caleffi	8	Itália
Munro, W.J.	7	U.K.

Nemoto, K.	7	Japão
Pan, J.-W.	7	China
Azuma, K.	5	Japão
W. J. Munro	5	U.K.
Zheng, M.-Y.	4	China
Chen, H.	4	China
Devitt, S.J.	4	Austrália
Tittel, W.	4	Suécia
Gyongyosi, Laszlo	4	Hungria
Oblak, D.	4	Canadá
Zhang, Q.	4	China
Caleffi, M.	4	Itália
Stephens, A.M.	4	Austrália
Jiang, X.	4	China
Cacciapuoti, A.S.	4	Itália
Hanson, R.	4	Suécia
L. Hanzo	4	U.K.
Nam, S.W.	4	Canadá
K. Nemoto	4	Japão
Imre, S	4	Hungria
Xie, X.P.	4	China
Yu, Y.	3	China
R. Van Meter	3	Japão

Fonte: Desenvolvida pelos autores (2022).

O autor Laszlo Gyongyosi (Gyongyosi, L.), pesquisador associado a *Budapest University of Technology and Economics*, foi o autor com mais publicações encontradas nesta análise (20 publicações), seguido por Sandor Imre (Imre, S.) também da *Budapest University of Technology and Economics* com 17 publicações.

Os autores listados na Tabela 6 são, em sua maioria, de países europeus ou associados a universidades europeias, sendo 14 autores europeus ou associados a universidades europeias, 11 asiáticos ou associados a universidades asiáticas. Vale lembrar que os dois únicos países que aparecem entre os asiáticos são a China,

com 7 autores, e o Japão com 4 autores. Na América do Norte, surpreendentemente, só se observou 2 autores do Canadá. Na Oceania, apenas a Austrália tem autores (2) que publicam sobre o tema.

Destaca-se também que dentre os autores listados na Tabela 6, há somente uma mulher, sendo esta Stephanie Wehner (Wehner, S.) da *Delft University of Technology*, Holanda, sugerindo que o interesse pelo tema está em grande parte nos pesquisadores do gênero masculino.

Para auxiliar a visualização das informações supracitadas com relação aos países com mais autores que foram publicados, apresenta-se o Gráfico 2.

Gráfico 2. Total de publicações por país



Fonte: Desenvolvida pelos autores (2022).

A seguir, é demonstrada a análise lexical dos resumos dos estudos utilizados na RSL. A análise realizada foi a contagem de frequência de palavras ou expressões. A nuvem apresentada na Figura 2 exibe todas as palavras encontradas

na análise, mas somente foram consideradas as palavras ou expressões com frequência igual ou superior a 10.

A palavra com maior frequência é “Internet” com 94 ocorrências, em seguida, tem a expressão “*Quantum entanglement*” com 26 ocorrências, as palavras “*Memory*” e “*Qubit*” aparecem com o mesmo número que a expressão “*Quantum Internet*” com 19 ocorrências, a palavra “*Repeaters*” e as expressões “*Quantum computing*” e “*Quantum networks*” possuem 13 ocorrências.

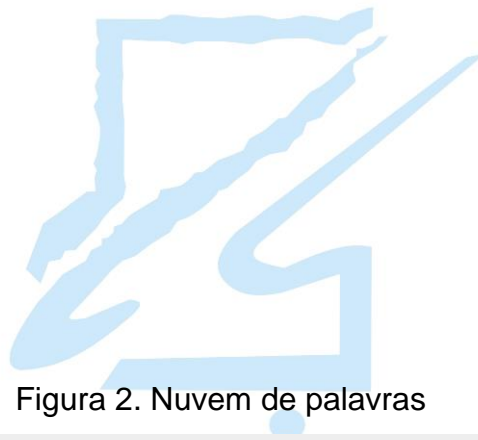
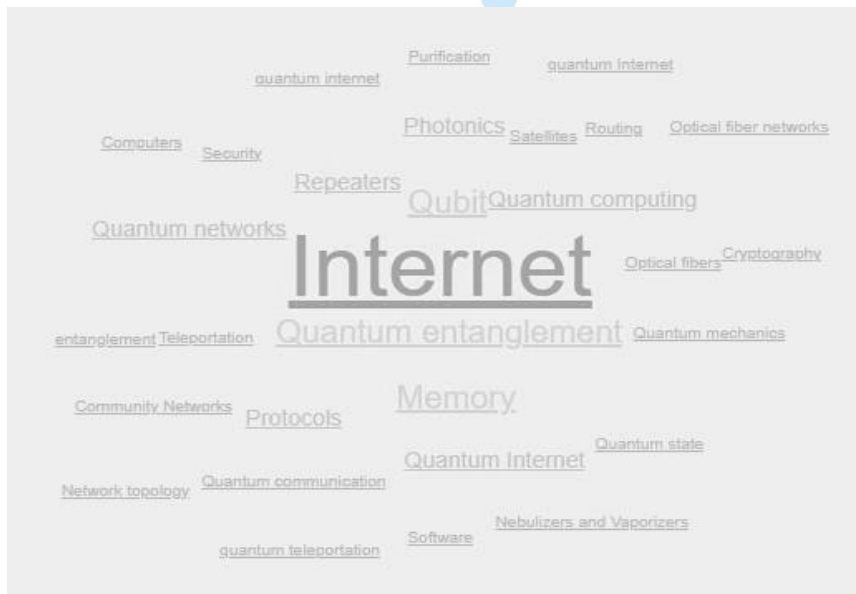


Figura 2. Nuvem de palavras



Fonte: Desenvolvida pelos autores (2022).

A análise por frequência de palavras corrobora com o tema das buscas que envolvem a Internet quântica e os estudos que vêm sendo realizados a respeito do tema. A palavra “Internet”, que apresenta a maior frequência, combinada com as

expressões “Quantum entanglement” e “Quantum Internet”, sugerem que os estudos se alinham com o tema central deste trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste momento é oportuno retomar o objetivo que originou este estudo – apresentar o estado da arte do tema Internet Quântica. Observou-se uma maioria de estudos sendo realizados e publicados por autores europeus ou associados a universidades europeias, seguido de autores do continente asiático ou associados a universidades asiáticas. Surpreendentemente, observou-se poucas publicações feitas por autores norte-americanos ou associadas a universidades norte-americanas. As análises permitiram identificar que o autor Laszlo Gyongyosi (Gyongyosi, L.), pesquisador associado da *Universidade Budapest University of Technology and Economics*, como o mais prolífico, seguido por Sandor Imre (Imre, S.), também da *Universidade Budapest University of Technology and Economics*. Ambos os autores são da Hungria, colocando o país como aquele que possui o maior número de publicações no mundo sobre o tema Internet Quântica.

Nossas análises permitiram concluir que o número de publicações acerca do tema Internet Quântica aumentou de forma regular até o ano de 2020 (101), que teve praticamente o dobro de publicações se comparado ao ano de 2019 (54). A partir do ano de 2020, o número de publicações apresenta tendência de crescimento (2020 - 100), 2021 - 131 e, até agosto de 2022, já havia 85 publicações sobre o tema, sendo possível que esse número supere o ano de 2021.

As análises também evidenciaram que a editora científica com maior número de publicações é a Nature (33). A biblioteca digital com o maior número de publicações indexadas é o IEEE Xplore Digital Library com 42 estudos indexados, sugerindo ser esta a biblioteca e indexador principal quando o tema é Internet Quântica.

Por fim, destacamos que não foram observadas publicações sobre a Internet Quântica em periódicos científicos brasileiros, por mais que a pesquisa tenha sido realizada apenas usando o termo em inglês “Quantum Internet”, não foram identificadas publicações em periódicos nacionais bilíngues com indexação nas bases de dados pesquisadas. Esse resultado pode sugerir uma falta de interesse dos pesquisadores brasileiros pelo tema ou dos próprios periódicos nacionais.

Mesmo sendo seguidos princípios metodológicos característicos de um estudo científico, limitações devem ser consideradas. O estudo se limitou a buscas em estudos publicados na língua inglesa, excluindo-se trabalhos que porventura possam ter sido publicados na língua portuguesa, espanhola, mandarim ou outra língua que não a inglesa.

Como trabalhos futuros, sugere-se acompanhar a publicação de estudos que envolvem a Internet Quântica com o intuito de se traçar uma evolução temporal do tema e facilitar a produção de novos estudos.

REFERÊNCIAS

ABELÉM, A. J. G.; ROTHENBERG, C. R. E. Desafios e Oportunidades rumo à Internet Quântica. In: **Workshop de Comunicação e Computação Quântica (WQUANTUM)**, 1, Uberlândia. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021. p. 13-18. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/wquantum.2021.17221>.

ALBRECHT, B.; FARRERA, P.; FERNADEZ-GONZALVO, X et al. A waveguide frequency converter connecting rubidium-based quantum memories to the telecom C-band. **Nat Commun**, v. 5, n. 3376, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms4376>.

ALBRECHT, B.; FARRERA, P.; HEINZE, G.; CRISTIANI, M.; RIEDMATTEN, H. **Controlled Rephasing of Single Collective Spin Excitations in a Cold Atomic Quantum Memory**, 2015, American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.160501>

ARANTES, J. T. **Experimento obtém emaranhamento de seis ondas luminosas com um único laser**, 2018. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/~fotonica/pt-br/news/pesquisa-sobre-emaranhamento-quantico-em-destaque>

BALIĆ, V.; BRAJE, D. A.; KOLCHIN, P.; YIN, G. Y.; HARRIS, S. E. **Generation of Paired Photons with Controllable Waveforms**. 2005.American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.94.183601>

CHOU, C. W.; POLYAKOV, S. V.; KUZMICH, A.; KIMBLE, H. J. **Single-Photon Generation from Stored Excitation in an Atomic Ensemble**, 2004. American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.213601>

DUAN, LM.; LUKIN, M.; CIRAC, J. et al. **Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics**. Nature 414, 413–418 (2001). Disponível em :<https://doi.org/10.1038/35106500>

EITAN, A. T.; SMOLYANSKY, E.; HARPAZ, I. K. (2021). **Connected Papers**. Retrieved March 8, 2021, from <https://www.connectedpapers.com/about>

FLEISCHHAUER, M.; LUKIN, M. D. **Dark-State Polaritons in Electromagnetically Induced Transparency**, 2000. American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.5094>

FROGERI, R. F.; ZIVIANI, F.; MARTINS, A. DE P.; MARIA, T. C.; ZOCAL, R. M. F. **O grupo de trabalho 4 do Enancib: uma análise bibliométrica. Perspectivas em Gestão & Conhecimento**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 235–252, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/pgc/article/view/62824>

GOBAN, A. **Strong atom-light interactions along nanostructures: Transition from freespace to nanophotonic interfaces**, 2015. California Institute of Technology. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/f1c325424375f498cd1094a89be9c5ea/1?pqorigsite=gscholar&cbl=18750>

HESHAMI, K.; ENGLAND, D.; HUMPHREYS, P.; BUSTARD, P. J.; ACOSTA, V.; NUNN, J.; SUSSMAN, B. **Quantum memories: emerging applications and recent advances**, 2015. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09500340.2016.1148212>

HORODECKI, R.; HORODECKI P.; HORODECKI M.; HORODECKI K. **Quantum entanglement**, 2007. Disponível em: https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0702225.pdf?ev=pub_ext_btn_xdl

JAWAID, Tajdar. Quantum Computing and the Future Internet. **ISSA Journal**, n. May, p. 19–24, 2022. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2203.06180>>. SATOH, Takahiko et al. Attacking the Quantum Internet. **IEEE Transactions on Quantum Engineering**, v. 2, 2021.

JOHNSON, N.; PHILLIPS, M. **Rayyan for systematic reviews**. *Journal of Electronic Resources Librarianship*, 30(1), 46–48.(2018) Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1941126X.2018.1444339>

JULSGAARD, B.; SHERSON, J.; CIRAC, J. et al. **Experimental demonstration of quantum memory for light**. *Nature* 432, 482–486 (2004). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature03064>

JULSGAARD, B.; KOZHEKIN, A.; POLZIK, E. **Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects**. *Nature* 413, 400–403 (2001). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35096524>

KIMBLE, H. J. **The Quantum Internet**, 2008. Disponível em: [The quantum internet | Nature](#). Artigo completo: [0806.4195.pdf \(arxiv.org\)](https://arxiv.org/abs/0806.4195)

LIU, C.; DUTTON, Z.; BEHROOZI, C. et al. **Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses**. Nature 409, 490–493 (2001). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35054017>

LONGDELL, J. J.; FRAVAL, E.; SELLARS, M. J.; MANSON, N. B. **Stopped Light with Storage Times Greater than One Second Using Electromagnetically Induced Transparency in a Solid**, 2005. American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.063601>

LIJUN, M.; SLATTERY, O; TANG, X. **Optical quantum memory based on electromagnetically induced transparency**, 2017. J. Opt. 19 043001. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8986/19/4/043001/meta>

MAYNARD, M. **Stockage d'impulsions lumineuses dans l'hélium métastable à température ambiante**, 2016. Disponível em: <https://www.theses.fr/2016SACLS445>

MATSUKEVICH, D. N.; CHANELIÈRE, T.; BHATTACHARYA, M.; LAN, S.-Y.; JENKINS, S. D.; KENNEDY, T. A. B.; KUZMICH, A. **Entanglement of a Photon and a Collective Atomic Excitation**, 2005. American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.040405>

MOSHARRAF, Firouz; FOROUZAN, Behrouz A. **Redes de Computadores: Uma Abordagem Top-down**. 1. ed. São Paulo: Amgh, 2013.

ONODY, R. N. **Já se pesquisa a criação da “Rede de Internet Quântica”**, 2021. Disponível em: <https://www2.ifsc.usp.br/portal-ifsc/ja-se-pesquisa-a-criacao-da-rede-de-internet-quantica/>

PANT, M.; KROVI, H.; TOWSLEY, D. ET AL. **Routing entanglement in the quantum internet**. npj Quantum Inf 5, 25 (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41534-0190139-x>

PRITCHARD, A.; WITTIG, G.R. **Bibliometrics**. Watford, Hertfordshire: ALLM Books, 1981.

PHILLIPS, D. F.; FLEISCHHAUER, A.; MAIR, A.; WALSWORTH, R. L.; LUKIN, M. D. **Storage of Light in Atomic Vapor**, 2000. American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.86.783>

PHILLIPS, N. **Slow and Stored Light Under Conditions Of Electromagnetically Induced Transparency and Four Wave Mixing In an Atomic Vapor**, 2011. College of William and Mary. Disponível em: <https://scholarworks.wm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3380&context=etd>

CHEN, S.; CHEN, Y.; STRASSEL, T.; YUAN, Z.; ZHAO, B.; SCHMIEDMAYER, J.; PAN, J. **Deterministic and Storable Single-Photon Source Based on a Quantum Memory**, 2006. American Physical Society. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.173004>

SINGH, A.; DEV, K.; SILJAK, H.; JOSHI, H. D.; MAGARINI, M. "Quantum Internet- Applications, Functionalities, Enabling Technologies, Challenges, and Research Directions," in **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 23, no. 4, pp. 2218-2247, Fourthquarter 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9528843>.

SOUSA, M. S.; PAULO, A. F.; SILVA, F. O.; PEREIRA, J. H. S. **Caracterização das pesquisas sobre a próxima rede global de comunicação: a Internet Quântica**. In: WORKSHOP DE COMUNICAÇÃO E COMPUTAÇÃO QUÂNTICA (WQUANTUM), 1. 2021, Uberlândia. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2021. p. 7-12. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/wquantum/article/view/17220>

SPARKES, B. **Storage and manipulation of optical information using gradient echo memory in warm vapours and cold ensembles**, 2013. Australian National University. Disponível em: <https://openresearch-repository.anu.edu.au/handle/1885/10578>

TANENBAUM, Andrew; FEAMSTER, Nick. **Redes de Computadores**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2021.

TIRANOV, A. **Exploring storage capability of a solid-state quantum memory for light**, 2016. Université de Genève. Disponível em: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:89502/>

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. (2002). **Analyzing the Past To Prepare for the Future: Writing a Review**. MIS Quarterly, 26(2), xiii–xxiii. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/4132319>

ZAIDI, Syed Mohammad Hassan et al. Quantum Internet: A Revolutionary Disruption. **IEEE 19th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI, HONET 2022**, p. 146–150, 2022.

Educacional