

Comunicação Quântica: Panorama Mundial e Potenciais Aplicações Para a Força Aérea

Denys Derlian C. Brito¹, André J. C. Chaves¹, Victor G. M. Duarte¹ e Rodrigo P. Ferreira¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/ São Paulo — Brasil

Abstract— A comunicação quântica se utiliza de propriedades de superposição e emaranhamento da mecânica quântica para garantir uma vantagem adicional em relação à comunicação clássica. Ela surge como um dos braços das tecnologias quânticas, que possuem grande potencial disruptivo em relação às contrapartidas clássicas. A comunicação quântica está entre as tecnologias quânticas mais maduras, já sendo demonstrada tanto via fibra óptica quanto por espaço livre, incluindo comunicação via satélite. Neste artigo, é discutido o conceito de comunicação quântica, com a apresentação do panorama mundial na referida área, com enfoque na Europa, nos Estados Unidos e na China. Por fim, suas potenciais aplicações no âmbito do poder aéreo são analisadas e discutidas.

Keywords— Comunicação Quântica, Tecnologias Quânticas, Defesa.

I. INTRODUÇÃO

A comunicação quântica é uma área de pesquisa que tem despertado grande interesse tanto do ponto de vista teórico quanto prático. Baseada nos princípios da Mecânica Quântica, a comunicação quântica permite transmitir informações de forma segura, pois, caso haja a sua interceptação, há a garantia de detecção desta interceptação [1]. Essa característica faz com que a comunicação quântica seja uma opção promissora para diversas aplicações, incluindo aplicações militares [2].

No âmbito da Força Aérea Brasileira, a implementação de tecnologias quânticas vai ao encontro do conceito de versatilidade previsto na Estratégia Nacional de Defesa. A versatilidade permite alterar a postura militar, mantendo a aptidão para executar uma ampla gama de tarefas. Isso inclui capacidades ofensivas ou defensivas, contra alvos em ambientes aéreo, submarino, superfície, terrestre, cibernético e eletromagnético, além de poderem participar de operações singulares ou conjuntas, bem como multinacionais. Isso é essencial para enfrentar os diferentes níveis de prontidão exigidos por vários cenários [3].

Em relação a sensores quânticos, computação quântica e comunicação quântica, verifica-se que são fruto de um avanço na área de tecnologias de informação quântica, que visa processar, comunicar e armazenar informação quântica [4], e, portanto, possuem uma base em comum. Nesse cenário, destaca-se a necessidade da segurança das informações durante a comunicação num cenário militar, sendo fundamental ter comunicações confiáveis, robustas e seguras para garantir a proteção da informação. Nesse sentido, o avanço na pesquisa e desenvolvimento de comunicação quântica na esfera militar também será útil para o desenvolvimento de áreas correlatas.

Denys Derlian C. Brito, denysderlian@hotmail.com; André J. C. Chaves, andrej6@gmail.com; Victor G. M. Duarte, vgmduarte@gmail.com; Rodrigo P. Ferreira, rodrigo.ferreira@ga.ita.br.

A. Metodologia

A metodologia adotada envolveu pesquisas e revisões bibliográficas detalhadas. Para obter informações relevantes sobre o tema, foram analisados documentos em bases de dados acadêmicas, bem como em periódicos especializados em comunicação quântica e tecnologias afins. Além disso, foram analisados relatórios, publicações oficiais e documentos de órgãos governamentais e instituições de pesquisa, visando obter dados sobre o panorama mundial da comunicação quântica e suas aplicações para a Força Aérea.

Foi feita a análise qualitativa das informações coletadas por meio da revisão dos estudos selecionados, sendo identificadas tendências, desenvolvimentos tecnológicos, avanços na área e casos de aplicação prática da comunicação quântica em ambientes aeroespaciais, sendo possível oferecer uma visão ampla e concisa do cenário global da comunicação quântica, abordando avanços recentes, tendências promissoras e possíveis aplicações específicas para a Força Aérea.

Em suma, este artigo fornece uma visão abrangente da comunicação quântica e seu potencial impacto na Força Aérea e em contextos militares. Na seção (II) aborda os princípios fundamentais, componentes básicos e aplicações da comunicação quântica, na seção (III), são apresentados os avanços na Europa, Estados Unidos e China, destacando a liderança da China e o interesse europeu e americano em se manterem competitivos na área. Por fim, a seção (IV) analisa as possibilidades de utilização da comunicação quântica em contextos militares, incluindo comunicação terrestre, ar-solo e ar-ar, e comunicação espacial.

II. COMUNICAÇÃO QUÂNTICA

Pode-se definir comunicação quântica como uma forma de transmitir informação com base nos princípios da Mecânica Quântica [5]. Apesar de ser uma área ainda relativamente incipiente, há muitos investimentos [6] sendo realizados para avançar a comunicação quântica do ponto de vista teórico – pela proposição de novos métodos e algoritmos [7] – e prático – por meio do aperfeiçoamento do *hardware* envolvido [8].

Ainda que existam diferentes propostas de *hardware* para comunicação quântica, a base desta consiste em um emissor e receptor quântico que se conectam por meio de um canal quântico por onde ocorre a transmissão de informação [5]. Nesse contexto, emissores são dispositivos que estados quânticos da luz, como fótons, os quais são usados para armazenar informação que alcançará os receptores quânticos. Dentre as arquiteturas possíveis de emissores, destacam-se os semicondutores [9], os centros de vacância de nitrogênio (NV) em diamantes [10] e estruturas baseadas em moléculas e átomos isolados [11].

Além de emissores, a comunicação quântica também depende de receptores quânticos que recebem e decodificam a informação contida nos fótons que fluem pelo canal quântico, o que pode ser fibra ótica, vácuo ou até mesmo o ar [12]. Os receptores quânticos, por sua vez, podem ser precisos detectores de fótons isolados [13], interferômetros [14] ou dispositivos de “memória quântica” [15] – capazes de armazenar informação por um longo tempo.

A combinação de tais componentes (emissor, receptor e canal) torna a comunicação quântica uma área com usos em diversos contextos. O protocolo quântico, *i.e.*, o conjunto de regras que rege como a informação quântica será transmitida e decodificada, irá determinar como funciona aquela determinada aplicação. Nesse sentido, destaca-se a obtenção de uma comunicação mais segura [16], uma vez que é impossível interceptar um canal quântico sem ser detectado. Este princípio pode ser estendido a virtualmente qualquer situação de comunicação sigilosa, como a transmissão de códigos militares e dados bancários.

Nesse contexto, destaca-se a distribuição de chave quântica (de sigla QKD em inglês), na qual duas partes usam emissores e receptores quânticos para gerar e decodificar uma chave secreta usada para encriptar mensagens sensíveis [17]. Além da segurança elevada já mencionada previamente, a QKD também apresenta a vantagem de poder, em teoria, realizar a troca de chaves em distância superior aos protocolos clássicos atuais sem perda de fidelidade de informação [18].

Comunicação quântica também pode ser empregada na construção de redes quânticas (*quantum networks*), o que pode ser usado para conectar diferentes dispositivos quânticos, com aplicações em computação quântica [19]. Outras importantes aplicações de comunicação quântica incluem construir sensores mais acurados, o que pode ter repercussão em diversos ramos da indústria [20].

Apesar de muitos avanços recentes em comunicação quântica, ainda existem pontos de melhoria que devem ser endereçados. Os principais desafios atuais residem em mitigar o efeito de ruídos e interferências externas nos emissores e receptores quânticos, os quais ainda são muito sensíveis a tais efeitos [21]. Ademais, também são feitas diversas pesquisas para aumentar de forma prática o alcance da comunicação quântica atual [22], mantendo fidelidade da informação ao nível compatível com os protocolos clássicos vigentes.

III. PANORAMA MUNDIAL

A presente sessão discorre sobre os principais avanços em comunicação quântica na Europa, Estados Unidos e China.

A. Panorama Europeu

A política europeia acerca da pesquisa e desenvolvimento em tecnologias relacionadas à comunicação quântica advém do *Framework Program Horizon*, o qual se encontra na sua nona versão [23]. Em linhas gerais, esse programa define uma Agenda de Pesquisa Estratégica [24], delineando metas e realizações esperadas em várias áreas, incluindo a comunicação quântica. Essa agenda inclui o desenvolvimento de dispositivos e sistemas para redes quânticas, bem como a exploração de protocolos que aproveitam as propriedades únicas da comunicação quântica.

A Europa tem um forte compromisso com a pesquisa e o desenvolvimento da comunicação quântica. Por meio do lançamento do Quantum Manifesto [25], a Europa demonstrou interesse em liderar a segunda revolução quântica, buscando fortalecer suas capacidades em tecnologias quânticas e criar uma indústria lucrativa baseada em conhecimento. Além disso, a Europa está fortemente empenhada em impulsionar a pesquisa e a inovação na comunicação quântica, buscando se tornar um líder global nessa área.

Atualmente, como fortes *players* no cenário em questão, tem-se o Reino Unido, a Alemanha e, em especial, a Dinamarca. Em 2022, a Dinamarca foi selecionada como país-sede do novo Centro de Tecnologias Quânticas da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), e a Fundação Novo Nordisk anunciou um investimento de 1,5 bilhão de coroas dinamarquesas no desenvolvimento de um computador quântico totalmente funcional, o que fez com que, em 2023, o governo dinamarquês lançasse uma nova estratégia para pesquisa e inovação em quântica. A estratégia visa manter um foco de longo prazo na pesquisa e inovação quântica, garantindo que a Dinamarca se mantenha na vanguarda e desempenhe um papel fundamental no futuro da tecnologia quântica. O forte ecossistema quântico da Dinamarca, combinado com a nova estratégia, torna-a um destino ideal para empresas estrangeiras interessadas em investir e estabelecer parcerias de pesquisa e desenvolvimento em tecnologias quânticas [26].

Em julho de 2023, a Comissão Europeia lançou uma chamada para licitações visando desenvolver uma infraestrutura de teste e avaliação para tecnologias de distribuição quântica de chaves (QKD) como parte da Iniciativa Europeia de Comunicação Quântica (EuroQCI), financiado com 16 milhões de EUR do Programa Europa Digital [27]. Essa infraestrutura planeja avaliar e certificar as tecnologias QKD desenvolvidas na União Europeia quanto ao cumprimento de padrões e especificações de segurança, contribuindo para a autonomia europeia em comunicação quântica. O contrato de serviço terá duração até o final de 2027. A infraestrutura será composta por componentes terrestres e espaciais, com tecnologias da União Europeia sendo utilizadas para o seu desenvolvimento. Ela também será interoperável com a iniciativa de conectividade espacial segura. As ações apoiadas pelo Programa Europa Digital serão complementadas por outros programas e fontes de financiamento, incluindo o *Framework Program Horizon* [23], já mencionado, e o *Connecting Europe Facility*, bem como o financiamento do Mecanismo de Recuperação e Resiliência [27].

B. Panorama Americano

O panorama americano em termos de desenvolvimento de tecnologias relacionadas à comunicação quântica ainda se mantém no escopo da Pesquisa e Desenvolvimento. Os Estados Unidos tratam o assunto como estratégico desde a concepção da sua política de ciência e tecnologia. A política de ciência e tecnologia dos Estados Unidos foi estabelecida pela Lei de Organização e Prioridades da Política Nacional de Ciência e Tecnologia de 1976 para fornecer assessoria ao Presidente. Sob esta política, encontra-se o Subcomitê de Ciência da Informação Quântica (SCQIS) do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia, que visa manter e expandir a liderança dos EUA na ciência da informação quântica e suas aplicações ao longo da próxima década [28].

Em termos de avanços recentes, em 2022, o SCQIS lançou planos estratégicos para o desenvolvimento da força de trabalho para a implementação de sensores quânticos, buscando promover oportunidades econômicas, aplicações de segurança e avanços científicos através do desenvolvimento de tecnologias quânticas [29]. Paralelamente, a administração Biden lançou políticas e iniciativas relacionadas à comunicação e computação quântica, identificando passos fundamentais para manter a vantagem competitiva dos EUA [30]. Recentemente, relatórios do Escritório de Prestação de Contas do Governo os Estados Unidos (GAO) indicam que o Departamento de Defesa (DOD), o Departamento de Estado (State), o Departamento de Segurança Interna (DHS) e o Escritório do Diretor de Inteligência Nacional (ODNI) avaliaram que “comunicações quânticas poderiam permitir que adversários desenvolvessem comunicações seguras que o pessoal dos EUA seria incapaz de interceptar ou decifrar” [31].

Em 2023, o Comitê Consultivo Nacional para a Iniciativa Quântica (NQIAC), órgão de assessoria ao Presidente do SCQIS, lançou um relatório com recomendações para manter a liderança americana em tecnologias quânticas. De modo a fomentar o desenvolvimento de tecnologias revolucionárias em computação e simulação quântica, redes e comunicação quântica, e sensoriamento e metrologia, o relatório chega a conclusão que o desenvolvimento dessas tecnologias é um fator crítico para a economia e segurança nacional dos Estados Unidos [32].

C. Panorama Chinês

Decerto, a China é o país na vanguarda no cenário mundial em termos de pesquisa e desenvolvimento da comunicação quântica. A China se destaca como pioneira na construção de infraestrutura quântica de comunicação em grande escala, superando limitações anteriores e expandindo as aplicações potenciais dessa tecnologia [33].

Em uma breve linha do tempo, em 2008, o físico chinês Pan Jianwei decidiu retornar à China e tornar a Universidade de Ciência e Tecnologia da China (USTC) sua instituição de pesquisa principal. Ele transferiu seu laboratório e projetos de Heidelberg, na Alemanha, para a cidade chinesa de Hefei, além de trazer consigo alguns de seus alunos chineses. Mesmo recebendo €1,4 milhão (1,5 milhão de dólares) de financiamento adicional da União Europeia naquele ano, ele conseguiu realizar a mudança. Desde seu retorno, a China tem anunciado regularmente avanços na área de comunicação quântica. Em 2016, Pan e sua equipe lançaram o primeiro satélite quântico do mundo ao espaço [34]. No outono de 2017, eles usaram o satélite Micius para realizar a primeira videoconferência à prova de interceptação entre Pequim e Viena [35].

Em 2021, os cientistas chineses conseguiram estabelecer a primeira rede de comunicação quântica integrada do mundo, combinando mais de 700 fibras ópticas no solo com dois *links* terrestres-satélite, permitindo a comunicação via QKD a uma distância de 4600 km [36]. O feito representa um marco importante, indicando que a tecnologia de comunicação quântica pode ser utilizada em aplicações práticas em larga escala. Além disso, sugere a possibilidade de se estabelecer uma rede global de comunicação quântica, combinando as redes quânticas nacionais de diferentes países.

Em março de 2023, pesquisadores chineses divulgaram que estão desenvolvendo uma rede de comunicação quântica utilizando satélites em órbitas terrestres baixas e médias a altas. A rede permitirá comunicação via QKD em larga escala. A iniciativa chinesa foi incluída em uma lista de megaprojetos tecnológicos estratégicos para avanços até 2030. A construção de uma rede global de comunicação quântica está em andamento, demonstrando o compromisso da China com a pesquisa e desenvolvimento nessa área [37].

IV. POTENCIAIS APLICAÇÕES NO ÂMBITO DO EMPREGO DO PODER AÉREO

O uso de tecnologias do escopo da comunicação quântica tem implicações importantes para aplicações militares, proporcionando comunicação segura, navegação precisa e detecção precisa, sendo considerada uma área promissora para melhorar as capacidades militares. De modo geral, essas características permitem a detecção de possíveis espionagens e garantem maior resistência contra ataques cibernéticos [38].

Isto posto, no âmbito da implementação de uma rede de comunicação quântica baseada na distribuição quântica de chaves (QKD), para se analisar as potenciais aplicações militares num domínio quântico de guerra, a Fig. 1 ilustra as várias formas de conexão num cenário militar:

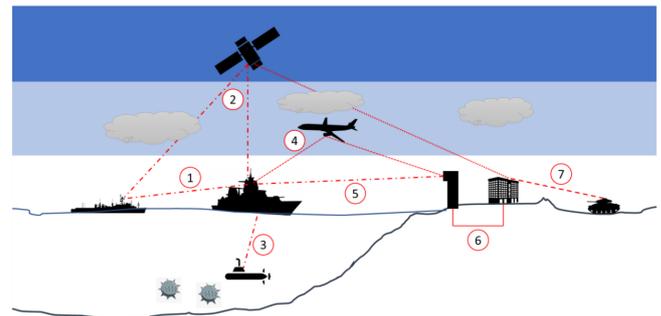


Fig. 1. Exemplos de usos militares de conexão com QKD [2]

Cada numeração da figura representa um *link* de comunicação. A maioria utiliza a comunicação via QKD em espaço livre, incluindo comunicação (laser) entre navios (1), satélites (2), embarcações submarinas (3), aviões e/ou aeronaves remotamente pilotadas (4), estações terrestres (5) e veículos (7). Além disso, é mostrado um canal de comunicação de fibra óptica entre duas estações terrestres (6). A comunicação de fibra óptica também permite a QKD entre ativos estratégicos em terra, como sedes, postos de comando, estações navais e bases aéreas, que geralmente possuem uma localização fixa ou semi-estática. [2].

Para o levantamento de potenciais aplicações com vistas ao emprego no Poder Aéreo, serão focadas as seguintes conexões categorizadas em “Comunicação Terrestre” (6 e 7), “Comunicação Ar-Solo e Ar-Ar” (4), e “Comunicação Espacial” (2). Cada uma dessas situações apresenta desafios específicos, mas a comunicação via QKD, entre outras opções avaliadas em cada segmento, pode ser uma solução viável para garantir a segurança das comunicações nessas condições, pois a segurança das comunicações seriam garantidas pelas leis da física [39].

A. Comunicação Terrestre

A categorização da comunicação terrestre engloba a utilização de tal tecnologia efetuada entre entidades estáticas ou semi-estáticas, localizadas em solo e, usualmente, a longas distâncias. O principal ganho seria naquilo concernente à segurança da comunicação. Isto posto, a principal alternativa para se estabelecer a comunicação seria a partir de QKD.

Para isso, existem, principalmente, dois métodos para operar redes de comunicação quântica em longas distâncias, sendo a rede de fibra óptica e a rede de espaço livre. No caso da comunicação terrestre, as redes de fibra óptica seriam mais benéficas, ao apresentarem uma reduzida probabilidade de decoerência e se pode utilizar a fibra óptica já existente. O modo multi-fibra também pode tornar a comunicação mais precisa. No entanto, a comunicação via QKD em sua forma básica é limitada a algumas centenas de quilômetros em fibra óptica, e é impossível, pelo menos por enquanto, armazenar a informação quântica e usar a fibra óptica ao mesmo tempo [40].

Exemplificando no contexto da Força Aérea Brasileira, a implementação de uma comunicação segura baseada em comunicação quântica poderia ser realizada no âmbito de todas as entidades da estrutura organizacional, as quais necessitam do trânsito de informações com segurança. Isso incluiria o Órgão de Direção-Geral, os Órgãos de Assessoramento Superior, os Órgãos de Assistência Direta e Imediata ao Comandante e os Órgãos de Direção Setorial, bem como suas unidades subordinadas [41].

Ressalta-se que tal ação corrobora com o preconizado no Plano Diretor de Tecnologia da Informação e Comunicação da Aeronáutica (PDTIC), no que tange às atribuições do Sistema de Tecnologia da Informação do Comando da Aeronáutica, e a sua implementação num contexto de emprego do Poder Aéreo traria como potencial retorno, no âmbito da comunicação terrestre, a “Garantia da segurança das informações, compreendendo a integridade, a confidencialidade, a disponibilidade, e a irretratabilidade das informações” [42].

B. Comunicação Ar-Solo e Ar-Ar

O cenário da comunicação ar-solo e ar-ar pode ser visualizado no processo de troca de informações e dados entre aeronaves entre si e/ou unidades terrestres. Nesse caso, pode-se focar em aplicações relacionadas a mensagens com baixa taxa de informação. Para atingir esses objetivos, a comunicação via QKD é uma alternativa, assim como exposto anteriormente. Todavia, outras possibilidades podem ser avaliadas.

Uma possibilidade seria a utilização de uma rede quântica para uma comunicação direta segura (QSDC) entre os atores envolvidos. A partir dessa abordagem, as mensagens diretas são criptografadas em dados quânticos, aproveitando a segurança similar à da QKD, porém, sem necessidade de distribuição de chaves, eliminando outras vulnerabilidades de segurança associadas ao armazenamento de chaves e ataques ao texto cifrado. No entanto, um obstáculo é a baixa taxa de qubits, limitando o envio apenas de mensagens simples e não de dados audiovisuais ou telemetria complexa. Em tais casos, a rede poderia mudar para o protocolo QKD para distribuir a chave e os dados criptografados por meio de canais clássicos [43].

Exemplificando no contexto da Força Aérea Brasileira, a implantação de uma rede de comunicação nos moldes do exposto acima seria essencial para a cooperação e integração de sistemas de Comando, Controle, Comunicações, Computadores, Inteligência, Vigilância e Reconhecimento, além da sincronização precisa de vários dados e ações em radares, dispositivos de guerra eletrônica, sistemas d’armas, etc. Isso inclui como atores os órgãos componentes dos: Sistema de Inteligência de Defesa (SINDE), Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), Sistema de Defesa Aeroespacial Brasileiro (SISDABRA), Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras (SISFRON) [41].

C. Comunicação Espacial

Tratando-se da comunicação espacial, refere-se à comunicação utilizando satélites ou em que um dos envolvidos encontra-se no espaço. Dessa forma, há a necessidade do desenvolvimento de uma rede de comunicação quântica para longas distâncias, maiores do que das categorias anteriores.

A primeira potencialidade a ser analisada seria a da determinação da posição exata a partir da implementação de uma rede quântica com sincronização de relógios, o que seria uma forma híbrida de comunicação. Nesse cenário, a comunicação se utilizaria de satélites GNSS, contudo, sem a preocupação com a falsificação e interferência. Isso seria possível a partir da sincronização de relógios independentes, especialmente relógios atômicos (utilizados nos satélites GNSS) e relógios digitais locais. Com relógios perfeitamente sincronizados, a precisão se tornaria arbitrariamente alta [44].

Outra potencialidade para a comunicação quântica baseada em satélites está relacionada com a sua precuidade em se estabelecer uma rede de *internet* quântica no futuro. Uma nova capacidade militar necessária será a tecnologia para detectar outros satélites, objetos espaciais, lixo espacial e rastrear-los. Nesse quesito, apesar da comunicação segura via satélites já ter sido demonstrada [45], uma constelação de satélites equipados com fontes de emaranhamento e memórias quânticas será necessária para criar conexões de múltiplos links dinamicamente configuráveis entre quaisquer dois pontos na Terra [19].

No contexto de aplicação nas Forças Armadas, uma comunicação quântica espacial poderia ser utilizado no âmbito do Sistema de Comunicações Militares por Satélite (SISCOMIS), que é principal instrumento de comunicações estratégicas para a interoperabilidade entre as Forças Armadas. No escopo do SISCOMIS encontra-se o projeto do Satélite Geostacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC), que permitirá a ampliação do Programa Nacional de Banda Larga (PNBL), além do uso da Banda X, exclusivamente militar, que servirá para aumentar as possibilidades de comunicações confiáveis e seguras do Sistema Militar de Comando e Controle — SISMC² [41].

O potencial retorno de uma comunicação espacial num cenário em quem há o emprego do Poder Aéreo converge para a melhoria da obtenção de forma segura da precisão exata de posição, o que é crucial em missões militares, como localizar aeronaves amigas, guiar munições de precisão e operar veículos autônomos [2]. Em outras palavras, haveria um avanço na utilização de satélites para navegação, mapeamento, comunicação e vigilância [46]. Tal ação é de

suma importância para o desenvolvimento de uma Força Aeroespacial num ambiente no qual o espaço se torna cada vez mais armado [47].

V. CONCLUSÃO

A comunicação quântica representa uma área de pesquisa promissora, tanto em âmbito teórico quanto prático, que tem despertado grande interesse em diversos setores. Baseada nos princípios da Mecânica Quântica, a comunicação quântica permite transmitir informações de forma segura e praticamente impossível de ser interceptada sem ser detectada. Essa característica a torna uma opção atrativa para garantir a segurança da informação em contextos militares.

A análise da evolução da comunicação quântica nos cenários mundial, europeu, americano e chinês, mostra que a China tem sido uma líder na pesquisa e desenvolvimento nessa área, realizando avanços significativos e estabelecendo redes de comunicação quântica em larga escala. Os EUA e a Europa também investem em pesquisas e iniciativas para manter sua competitividade e liderança nessa área.

No que tange às aplicações militares, verifica-se que o desenvolvimento e implementação de tecnologias de comunicação quântica tem um amplo impacto em várias áreas, incluindo Comando, Controle, Comunicações, Computadores, Inteligência, Vigilância e Reconhecimento, tendo em vista os protocolos de segurança e criptografia são viáveis [48].

No âmbito do emprego do Poder Aéreo, a comunicação quântica apresenta potenciais aplicações em diferentes cenários, incluindo a comunicação terrestre, ar-solo, ar-ar e espacial. A segurança das comunicações é essencial para a coordenação e integração das operações aéreas, e a comunicação quântica pode fornecer uma solução confiável e segura para garantir a proteção das informações sensíveis. No contexto da Força Aérea Brasileira, a implementação de tecnologias quânticas, incluindo a comunicação quântica, alinha-se com a Estratégia Nacional de Defesa.

No entanto, desafios tecnológicos ainda precisam ser superados para avançar na implementação da comunicação quântica em larga escala. A mitigação de ruídos e interferências externas nos emissores e receptores quânticos é um dos principais obstáculos a serem enfrentados. Além disso, é necessário ampliar o alcance da comunicação quântica e aumentar a sua taxa de transmissão para torná-la compatível com os protocolos clássicos existentes.

Portanto, a comunicação quântica apresenta um grande potencial para transformar as capacidades de comunicação da Força Aérea Brasileira e de outros órgãos militares, proporcionando maior segurança e eficiência nas operações. Investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento nessa área são essenciais para explorar todo o potencial dessa tecnologia e fortalecer a segurança nacional no contexto da guerra cibernética e das comunicações militares.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Lele, *Quantum Technologies and Military Strategy*, 1st ed., ser. Advanced Sciences and Technologies for Security Applications. Springer Cham, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72721-5>
- [2] N. M. P. Neumann, M. P. P. van Heesch, and P. de Graaf, "Quantum communication for military applications," arXiv:2011.04989 [quant-ph], 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.04989>
- [3] Brasil. Ministério da Defesa (MD), "Estratégia nacional de defesa - END," Ministério da Defesa, 2013. [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/459>
- [4] A. Sigov, L. Ratkin, and L. A. Ivanov, "Quantum information technology," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 28, p. 100365, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X22000346>
- [5] I. Kremer, *Quantum communication*. Citeseer, 1995, PhD thesis, Hebrew University of Jerusalem.
- [6] E. Gibney, "The quantum gold rush," *Nature*, vol. 574, no. 7776, pp. 22–24, 2019.
- [7] J. P. Keating, N. Linden, J. C. Matthews, and A. Winter, "Localization and its consequences for quantum walk algorithms and quantum communication," *Physical Review A*, vol. 76, no. 1, p. 012315, 2007.
- [8] S. Nauerth, F. Moll, M. Rau, C. Fuchs, J. Horwath, S. Frick, and H. Weinfurter, "Air-to-ground quantum communication," *Nature Photonics*, vol. 7, no. 5, pp. 382–386, 2013.
- [9] A. Branny, S. Kumar, R. Proux, and B. D. Gerardot, "Deterministic strain-induced arrays of quantum emitters in a two-dimensional semiconductor," *Nature communications*, vol. 8, no. 1, p. 15053, 2017.
- [10] K. W. Lee, D. Lee, P. Ovarthaiyapong, J. Minguzzi, J. R. Maze, and A. C. B. Jayich, "Strain coupling of a mechanical resonator to a single quantum emitter in diamond," *Physical Review Applied*, vol. 6, no. 3, p. 034005, 2016.
- [11] S. Bär, A. Chizhik, R. Gutbrod, F. Schleifenbaum, A. Chizhik, and A. J. Meixner, "Microcavities: tailoring the optical properties of single quantum emitters," *Analytical and bioanalytical chemistry*, vol. 396, pp. 3–14, 2010.
- [12] M. M. Wolf, D. Pérez-García, and G. Giedke, "Quantum capacities of bosonic channels," *Physical review letters*, vol. 98, no. 13, p. 130501, 2007.
- [13] M. Shcherbatenko, M. Elezov, G. Goltzman, and D. Sych, "Sub-shot-noise-limited fiber-optic quantum receiver," *Physical Review A*, vol. 101, no. 3, p. 032306, 2020.
- [14] E. T. Khabiboulline, J. Borregaard, K. De Greve, and M. D. Lukin, "Optical interferometry with quantum networks," *Physical review letters*, vol. 123, no. 7, p. 070504, 2019.
- [15] W. J. Munro, A. M. Stephens, S. J. Devitt, K. A. Harrison, and K. Nemoto, "Quantum communication without the necessity of quantum memories," *Nature Photonics*, vol. 6, no. 11, pp. 777–781, 2012.
- [16] G.-l. Long, F.-g. Deng, C. Wang, X.-h. Li, K. Wen, and W.-y. Wang, "Quantum secure direct communication and deterministic secure quantum communication," *Frontiers of Physics in China*, vol. 2, pp. 251–272, 2007.
- [17] V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. J. Cerf, M. Dušek, N. Lütkenhaus, and M. Peev, "The security of practical quantum key distribution," *Reviews of modern physics*, vol. 81, no. 3, p. 1301, 2009.
- [18] P. A. Hiskett, D. Rosenberg, C. G. Peterson, R. J. Hughes, S. Nam, A. Lita, A. Miller, and J. Nordholt, "Long-distance quantum key distribution in optical fibre," *New Journal of Physics*, vol. 8, no. 9, p. 193, 2006.
- [19] J. S. Sidhu, S. K. Joshi, M. Gündoğan, T. Brougham, D. Lowndes, L. Mazzarella, M. Krutzik, S. Mohapatra, D. Dequal *et al.*, "Advances in space quantum communications," *IET Quantum Communication*, vol. 2, no. 4, pp. 182–217, 2021, open Access. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1049/qtc.2.12015>
- [20] I. B. Djordjevic, *Quantum Communication, Quantum Networks, and Quantum Sensing*. Academic Press, 2022.
- [21] F. Bouchard, D. England, P. J. Bustard, K. L. Fenwick, E. Karimi, K. Heshami, and B. Sussman, "Achieving ultimate noise tolerance in quantum communication," *Physical Review Applied*, vol. 15, no. 2, p. 024027, 2021.
- [22] K. Stannigel, P. Rabl, A. S. Sørensen, P. Zoller, and M. D. Lukin, "Optomechanical transducers for long-distance quantum communication," *Physical review letters*, vol. 105, no. 22, p. 220501, 2010.
- [23] K. MASSADIKOV and M. Özhan, "High technology policy in the European union," *Journal of Yaşar University*, vol. 17, pp. 209–235, 01 2022.
- [24] Q. Flagship, "Strategic research agenda," Published by European Quantum Flagship, 2020, accessed: 2023-01-07. Available at https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=65402.
- [25] Quantum Flagship, "Quantum manifesto," 2016, accessed: 2022-07-05. [Online]. Available: https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf
- [26] "Denmark makes decision to spend 1 billion dkk on quantum research and innovation strategy," Ministry of foreign affairs in Denmark. [Online]. Available: <https://investindk.com/insights/denmark-makes-decision-to-spend-1-billion-dkk-on-quantum-research-and-innovation-strategy>

- [27] Comissão Europeia, “Infraestrutura de ensaio e avaliação da infraestrutura europeia de comunicação quântica (euroqci),” Publicação 05 Julho 2023. Disponível em: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pt/funding/testing-and-evaluation-infrastructure-european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>, 2023.
- [28] Subcommittee on Quantum Information Science, “Quantum information science and technology workforce development national strategic plan,” 02 2022.
- [29] S. on Quantum Information Science, “National strategic overview for quantum information science,” Executive Office of the President of the United States, September 2018.
- [30] J. Joseph R. Biden, “National security memorandum on promoting united states leadership in quantum computing while mitigating risks to vulnerable cryptographic systems,” White House, NSM-10, May 2022, as of November 3, 2022: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/04/national-security-memorandum-on-promoting-united-states-leadership-in-quantum-computing-while-mitigating-risks-to-vulnerable-cryptographic-systems/>.
- [31] K. M. Saylor, “Defense primer: Emerging technologies,” *Congressional Research Service*, 2021.
- [32] “Renewing the national quantum initiative: Recommendations for sustaining american leadership in quantum information science,” National Quantum Initiative Advisory Committee (NQIAC), Tech. Rep., June 2 2023, available at <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2023/06/NQIAC-Report-Renewing-the-National-Quantum-Initiative.pdf>.
- [33] Y. Yiu. (2023) Is china the leader in quantum communications? [Online]. Available: <https://www.insidescience.org/news/china-leader-quantum-communications>
- [34] J. Aron, “China launches world’s first quantum communications satellite,” *Space*. [Online]. Available: <https://www.newscientist.com/article/2101071-china-launches-worlds-first-quantum-communications-satellite/>
- [35] S. Petersmann and E. Felden. (2023) China’s quantum leap — made in germany. Date Accessed: 2023-07-16. [Online]. Available: <https://www.dw.com/en/chinas-quantum-leap-made-in-germany/a-65890662>
- [36] D. Makichuk, “China researchers score a quantum leap,” *Asia Times*, October 2021. [Online]. Available: <https://asiatimes.com/2021/10/china-pushes-quantum-comms-to-a-new-level/>
- [37] A. Jones, “China is developing a quantum communications satellite network,” *SpaceNews*, March 2023. [Online]. Available: <https://spacenews.com/china-is-developing-a-quantum-communications-satellite-network/>
- [38] K. M. Saylor and C. R. Service, “Defense primer: quantum technology,” 2021.
- [39] S. Lloyd and D. Englund, “Future directions of quantum information processing,” in *Proceedings of workshop on the emerging science and technology of quantum computation, communication, and measurement*, 2018.
- [40] J. Chen, “Review on quantum communication and quantum computation,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1865, p. 022008, 2021. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1865/2/022008>
- [41] Brasil. Ministério da Defesa (MD), “Livro branco de defesa nacional (lbdn),” Ministério da Defesa, Tech. Rep., 2013. [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/465>
- [42] Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, Estado-Maior da Aeronáutica, “Plano diretor de tecnologia da informação e comunicação da aeronáutica (pdtic),” Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, Estado-Maior da Aeronáutica, Tech. Rep., 2023.
- [43] R. Qi, Z. Sun, Z. Lin, P. Niu, W. Hao, L. Song, Q. Huang, J. Gao, L. Yin, and G.-L. Long, “Implementation and security analysis of practical quantum secure direct communication,” *Light: Science & Applications*, vol. 8, no. 1, p. 22, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0132-3>
- [44] P. Kómár, E. Kessler, M. Bishof, L. Jiang, A. S. Sørensen, J. Ye, and M. D. Lukin, “A quantum network of clocks,” *Nature Physics*, vol. 10, pp. 582–587, 2014.
- [45] C. J. Pugh, S. Kaiser, J.-P. Bourgoin, J. Jin, N. Sultana, S. Agne, E. Anisimova, V. Makarov, E. Choi, B. L. Higgins, and T. Jennewein, “Airborne demonstration of a quantum key distribution receiver payload,” *arXiv preprint arXiv:2305.6789*, 2023.
- [46] M. Krelina, “Quantum technology for military applications,” *EPJ Quantum Technology*, vol. 8, 12 2021.
- [47] N. W. Al-Rodhan, “Outer space security,” *Global Policy Journal*, 2020.
- [48] A. Kott, “Potential science and technology game changers for the ground warfare of 2050: selected projections made in 2017,” U.S. Army Research Laboratory, Technical Report ARL-TR-8283, 2018.