

Aspectos da comunicação óptica no espaço livre, a qual viabiliza a criptografia quântica entre aeronaves

Edison Puig Maldonado¹, Caio Regis Aguiar Moreira¹

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – A comunicação óptica no espaço livre tem permitido taxas de até centenas de Gbps, em conexões altamente direcionais e seguras, sendo a única tecnologia para conexões não cabeadas em curtas, médias e longas distâncias que viabiliza a troca de chaves criptográficas em canais quânticos. A partir da revisão do estado da arte dessa tecnologia, este trabalho busca discutir suas características e principais requisitos para conexões com e entre aeronaves e outras plataformas na atmosfera, além de sua importância e uso em defesa. É também apresentada a estratégia de estudo da criptografia quântica no espaço livre no novo Espaço de Tecnologias Quânticas do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

Palavras-Chave – comunicação óptica no espaço livre, sistemas de apontamento em FSO, FSO-QKD.

I. INTRODUÇÃO

Comunicação Óptica no Espaço Livre (*Free Space Optical Communication*, FSO ou FSOC) denomina a área de tecnologias de conexões e redes de dados que utilizam sinais nas faixas desde o infravermelho até o ultravioleta, na forma de feixes que se propagam no espaço livre (em geral, laser), para a transmissão de informações sem a necessidade de guias de onda tais como fibras ópticas [1, 2]. Comparada à comunicação via rádio, permite altíssimas taxas ($\gg$ Gbps), menores latências (~ 1 ms versus centenas de ms em RF), muito maior diretividade (fator 1000 $\times$ comparado a MW) e portanto muito maior segurança, para conectar estações terrestres e/ou plataformas em altitudes variadas, tais como aeronaves não tripuladas (UAV), tripuladas, aeróstatos e satélites.

Sistemas FSO têm sido cada vez mais aplicados a problemas e situações específicas (e de uso dual), devido à sua maior segurança e resistência a interferências. É uma modalidade alternativa de conexão para sistemas de comunicação e de controle. Além disso, a tecnologia FSO é a base para a implementação de técnicas quânticas de criptografia ou sensoriamento no espaço livre, as quais estão demonstrando impacto ainda mais disruptivo em cenários que requerem maior segurança e/ou resolução.

FSO requer, em geral, alinhamento muito mais preciso, apontamento dinâmico e maior estabilidade mecânica do que as técnicas RF. As menores dimensões transversais do feixe e a muito menor difração comparada à de feixes de micro-ondas levam a bloqueios de sinal por obstáculos de tamanho na escala humana, assim como uma menor penetração em ambientes urbanos ou em florestas, por exemplo. Em sensoriamento, oferece muito maior precisão, porém é mais susceptível a efeitos da atmosfera terrestre [3]. É bastante

sensível à turbulência, névoa, neblina, chuva e neve, o que pode levar à degradação do sinal [4].

Porém, quando comparados a sistemas RF, sistemas FSO permitem taxas muito maiores, são mais leves e consomem menos. Conexões rápidas de comunicação por fibras ópticas (OFC) e/ou FSO estão cada vez mais presentes nas redes de acesso, permitindo altos desempenhos nas arquiteturas 5G. Em especial, em situações nas quais a instalação de fibra óptica não tem viabilidade econômica, por exemplo, em áreas remotas ou em eventos, ou não tem viabilidade física, por exemplo, em desastres ou em operações militares [5], alguma técnica de transmissão sem fio é em geral empregada. FSO pode fornecer acesso de rápida implantação, com $\frac{1}{5}$ dos custos da conexão a fibra óptica, reconfigurável; tem maior capacidade (largura de banda), maior segurança e menor consumo de energia do que *links* de micro-ondas, sem necessidade de licenças de espectro.

FSO é tecnologia com nível de maturidade tecnológica, ou TRL (escala de 1 a 9), entre 8 e 9 em contextos tradicionais e TRL 7-8 em muitos novos contextos de aplicação. O mercado atual de FSO está em forte crescimento, avaliado em US\$ 1,5 bilhão e deverá crescer para US\$ 6 bilhões no início dos anos 2030 [6].

O estado da arte dessa tecnologia demonstra conexões de estações na superfície terrestre com terminais na lua (384.400 km), com satélites geoestacionários (GEO, 36.000 km), a taxas da ordem de 1 Gbps [7, 8]. Conexões FSO de estações terrestres com satélites em órbita baixa (LEO, 160 km a 2000 km) têm sido demonstradas em até 100 Gbps [9]. Se ambos os sistemas transmissor e receptor estiverem na atmosfera, taxas de Gbps são possíveis apenas em menores alcances. Em plataformas de altitudes elevadas (HAP, > 10 km), pesquisas objetivam demonstrar taxas de vários Gbps em alcances de centenas de km, mas resultados em geral ainda não estão disponíveis publicamente.

No caso de aeronaves e outras plataformas de média altitude (MAP), conexões FSO ar-ar de até 1 Gbps em distâncias de 100-200 km têm sido reportadas [10]. Em conexões solo-aeronave, resultados com alcance ao redor de 60 km são já conhecidos [11, 12]. Para MAP e LAP (plataformas de baixa altitude), diferentes estudos de FSO mostram resultados entre 1 Gbps a 100 Gbps [13].

Importante destacar que a aplicação a HAP, MAP e LAP representa um dos mais importantes impactos da tecnologia FSO, como verificado pelos números acima.

Apesar de experimentos em condições especiais e baixas taxas demonstrarem alcances maiores [14], sistemas terrestres têm apresentado desempenhos mais modestos: alcance de até 5 km à taxa de 1 Gbps ou de até 1 km à de 10 Gbps [15, 16].

FSO pode ser combinada com outras tecnologias de comunicação para melhorar a disponibilidade, a largura de banda e a cobertura, fornecendo *backhaul* de alta velocidade, links de última milha e redes redundantes entre *data centers*.

E.P.M., puig@ita.br; C.R.A.M., regiscram@ita.br. Trabalho financiado por Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, proc. 0734/24, e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT-Sinais), patrocinado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), proc. 406517/2022-3.

No Centro de Competência em Guerra Eletrônica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), trabalhamos em um programa de pesquisa que visa desenvolver e demonstrar capacidades de FSO e criptografia quântica em plataformas aerospaciais, especialmente para uso pela Força Aérea Brasileira (FAB). Neste artigo, discutimos os principais requisitos para FSO e aplicações duais.

II. PARÂMETROS E COMPONENTES CRÍTICOS PARA FSO

A. Comprimento de onda, qualidade do feixe e potência

A escolha do comprimento de onda em FSO é crítica e depende de fatores físicos, ambientais e regulatórios. A atmosfera absorve e espalha a luz de forma diferente conforme o comprimento de onda, também causando efeitos de cintilação provocada por turbulências [4]. Os comprimentos de onda ideais para FSO são em geral determinados por condições atmosféricas específicas, portanto podem diferir em cada projeto [17].

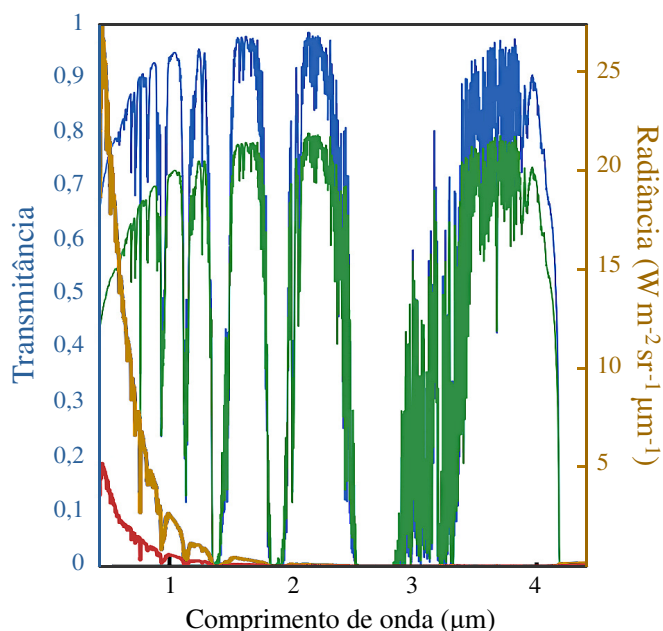


Fig. 1. Transmitância e radiação espectral em função do comprimento de onda, nas cidades de Tucson, Arizona (azul e ouro, respectivamente), seca, no verão, e Waterford, Irlanda (verde e vermelho), úmida, encoberta [17].

Os comprimentos de onda na faixa do visível (vis) e no infravermelho próximo (NIR) se beneficiam de baixa divergência e alta transmitância. No entanto, a alta radiação solar nesta faixa impõe o uso de receptores de área pequena e recursos de forte filtragem desse ruído. Estes sinais são também bastante susceptíveis aos efeitos de turbulência.

Já sinais no infravermelho curto (SWIR, 1,4–3 μm) apresentam divergência um fator ~2× maior que na faixa anterior, mas podem utilizar receptores ligeiramente maiores, sendo beneficiados pelo muito menor nível de radiação espectral solar de fundo (ver Fig. 1). Os sinais nesta faixa têm a maior transmitância na atmosfera e sofrem efeitos muito menores de cintilação (devidos à turbulência) que aqueles na faixa vis-IR [17]. Além disso, sinais ao redor do

comprimento de onda 1550 nm representam o menor perigo à visão, pois não atingem a retina, sendo predominantemente absorvidos pela córnea, pelo humor aquoso e humor vítreo. Assim, sistemas FSO urbanos preferem usar 1550 nm, para operar com potências mais altas sem riscos à saúde. Coincidentemente, este é o comprimento de onda mais importante de OFC e, portanto, componentes padrão de telecomunicações podem ser utilizados em projetos FSO. Em sistemas comerciais e militares, 1550 nm é preferido por permitir maior potência, dentro dos limites aceitos (ITU-R e FCC regulam potências máximas por comprimento de onda).

Para garantir um enlace FSO terra-aeronave ou aeronave-aeronave seguro, energeticamente eficiente e em altas taxas, feixes laser utilizados para transmissão devem atender a requisitos rigorosos de qualidade, alinhamento e estabilidade. Tendo como referência um alcance de 100 km, o parâmetro de qualidade do feixe (definido pela norma ISO 11146) deve ser $M^2 \leq 1,3$ (próximo à qualidade máxima, ou limite de difração, $M^2 = 1$), de forma a evitar uma seção transversal excessiva no ponto de recepção. Feixes muito divergentes, > 2 mrad, podem levar a perda significativa de relação sinal-ruído. Por exemplo, para $M^2 = 1,3$, se o raio de abertura do emissor for 5 cm, o diâmetro do feixe na recepção a 100 km é ~1,3 m, um limite aceitável. Assim, para obter essa qualidade de feixe, lasers a fibra ou DPSSL são indicados. A potência média neste tipo de enlace é em geral entre 1 e 10 W (o valor varia com a distância e a camada da atmosfera) [18, 19].

B. Esquemas de modulação

A escolha do esquema de modulação e da taxa de bits depende de fatores como distância, condições atmosféricas, consumo de energia e complexidade do sistema, além de aspectos como simplicidade ou alta sensibilidade e eficiência. Modulações por intensidade em geral são: DPIM (*Differential Pulse Interval Modulation*), PPM (*Pulse Position Modulation*) ou OOK (*On-Off Keying*). Técnicas de fase visando detecção coerente são usualmente: BPSK/QPSK (*Binary/Quadrature Phase-Shift Keying*) ou QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Outras técnicas avançadas são: OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) e OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access*). Em HAP de longas distâncias é preferível utilizar, PPM/BPSK. Em MAP, utiliza-se OOK/DPIM, de forma a equilibrar complexidade e taxa. Em LAP, é utilizado OOK por simplicidade e baixo custo [20].

C. Sensibilidade de detecção

A sensibilidade de detecção óptica em sistemas FSO como os descritos varia conforme uso e plataforma, a taxa de dados, o tipo de modulação e o fotodetector empregado. Para conexões com/entre HAP, MAP ou LAP, com taxa de erros de bits BER = 10^{-9} , a tecnologia de detecção é em geral APD (*Avalanche Photodiode*), mas detectores coerentes (BPSK/QPSK) ou PIN podem ser usados em casos particulares. Sensibilidades típicas, são -50 dBm a -40 dBm para HAP, -45 dBm a -35 dBm para MAP e -30 dBm a -20 dBm para LAP [21, 22].

D. Correção de distorções e erros no sinal óptico

Principais técnicas para mitigação de efeitos climáticos (névoa, neblina, chuva e neve) são: 1) comprimento de onda otimizado, 2) uso de múltiplos comprimentos de onda, 3) protocolos ARQ (*Automatic Repeat Request*), 4) redundância de enlace (vários *links* FSO físicos em um único *link* lógico, aumentando a largura de banda e fornecendo redundância).

Para compensação de erros de transmissão, usa-se codificação de canal (FEC), que consiste em adicionar redundância aos dados transmitidos, permitindo detecção e correção de erros no receptor. Outras técnicas são a modulação robustecida (seleção e implementação de esquemas de modulação mais resilientes às deficiências do canal) e a equalização digital (que envolve o uso de técnicas de processamento de sinal digital para compensar as distorções de sinal introduzidas pelo canal atmosférico).

Para compensação de efeitos devidos à turbulência, em especial cintilação e desvanecimento, as principais técnicas são: o uso de receptores com maior abertura (LAR), o que reduz as flutuações de intensidade ao coletar mais luz, a diversidade espacial (MIMO), onde múltiplos transmissores e receptores reduzem o impacto do desvanecimento (*fading*) no sinal, ou óptica adaptativa (AO), que usa sensores de frente de onda e espelhos deformáveis controlados por algoritmo que corrige distorções em tempo real.

Os avanços nessa área, em especial em óptica adaptativa, processamento de sinais e materiais fotônicos, indicam que FSO é uma tecnologia viável e disruptiva para o futuro nas comunicações aeronáuticas [23, 24].

E. Sistemas de apontamento

Um desafio em FSO no caso de plataformas móveis se deve à criticidade típica do apontamento (alinhamento) e rastreamento (acompanhamento) do feixe, essencial para garantir a estabilidade e a eficiência da comunicação, minimizando o tempo de aquisição e mantendo a qualidade do sinal durante a transmissão. Realizam essas funções o sistema de apontamento e acompanhamento dinâmico (*Pointing, Acquisition, and Tracking*, PAT) [25]. Os sistemas PAT são componentes essenciais de FSO no caso de plataformas aéreas (aeronaves tripuladas, UAVs, satélites), terrestres (veículos) ou navais (embarcações, USV). Os sistemas PAT garantem que o feixe de sinal esteja corretamente alinhado entre transmissor e receptor, independentemente do movimento relativo, vibração ou perturbações atmosféricas. Subsistemas PAT:

1. Sistema de apontamento, formado por *gimbals* e/ou espelhos de direcionamento do feixe, sistemas de navegação inercial (INS) e/ou GPS. Pode atuar em etapas: um apontamento aproximado posiciona o feixe dentro do campo de visão (FoV) do sistema de aquisição.

2. Sistema de aquisição, formado por sensores de grande angular, que escaneiam e detectam o sinal de referência (*beacon*) da outra extremidade. Objetivo: detectar e otimizar a captura do sinal óptico do terminal remoto. Técnicas: varredura sequencial ou rápida usando múltiplos sensores. Desafio: atraso e incerteza na presença de movimento.

3. Sistema de rastreamento – visa manter continuamente o alinhamento entre os transceptores ópticos à medida que as plataformas se movem. Pode ser aproximado: por *gimbal* ou orientação da plataforma, ou preciso: direcionamento rápido em espelhos (FSMs) ou dispositivos MEMS, para correção submiliradiana. Utiliza detectores de quadrante, detectores sensíveis à posição (PSDs), rastreamento baseado em câmera.

Requisitos do PAT:

1. Alta precisão, pois a divergência do feixe FSO é extremamente pequena: para enlaces de longa distância, (HAP, MAP), é de poucas centenas de μrad . Para outros enlaces (LAP, veículos terrestres) $\leq \text{mrad}$. Portanto, mesmo pequenos desalinhamentos podem interromper a conexão.

2. Baixa latência: devem reagir em ms ou menos para corrigir o movimento da plataforma, a vibração e a turbulência atmosférica.

3. Compensação de vibração: especialmente em UAVs ou veículos, a vibração de alta frequência afeta a estabilidade do feixe. Soluções: amortecimento ativo de vibração, estabilização inercial e circuitos de controle de *feedback*.

4. Coordenação de terminal duplo: ambas as plataformas frequentemente operam em modo de circuito fechado: cada uma rastreia o sinal da outra e se ajusta de acordo.

Recursos avançados: compensação suave de movimento por rastreamento preditivo, fusão multissensorial (GPS + unidades de medição inercial + rastreamento visual), filtros de Kalman. Soluções tecnológicas para os PAT podem envolver dispositivos MEMS e algoritmos de aprendizado de máquina [26, 27].

F. Terminais ópticos



Fig. 2. Terminal FSO LAC-12 da empresa *General Atomics*, com conectividade ar-espço, ar, terra e retransmissão marítima (<https://www.ga-asi.com/multi-mission-payloads/lac12-pod>)

Terminais ópticos (*FSO Transceivers*) são equipamentos que integram os componentes discutidos acima e permitem a comunicação FSO, transmitindo e recebendo dados no espaço livre por meio de feixes ópticos. É o componente central de um sistema FSO em conexões terrestres, aéreas ou espaciais, combinando óptica de precisão, rastreamento inteligente e eletrônica avançada para criar enlaces de alta velocidade sem fio. Seu desempenho depende criticamente do ambiente (atmosfera, distância) e da tecnologia de compensação (por exemplo, óptica adaptativa). O projeto desses terminais deve equilibrar soluções para os vários desafios, dentre eles: qualidade do feixe, alinhamento preciso, estabilidade mecânica (vibração, acelerações), mitigação de efeitos atmosféricos, técnicas de correção de erros e controle de potência (também visando a segurança aos usuários).

III. MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Sistemas FSO oferecem um alto nível de relação sinal-ruído (SNR), mesmo assim, a confiabilidade das conexões é afetada pelos fatores apresentados acima e deve ser avaliada em termos de algumas métricas de desempenho [28]:

- Taxa de Erro de Bit, BER - a relação entre bits recebidos incorretamente e o número total de bits transmitidos no sistema de comunicação FSO. FSOs confiáveis têm BER de 10^{-6} ou menos. Métodos de melhoria de BER: códigos de correção de erros, óptica adaptativa (para reduzir os efeitos da turbulência), maior potência de transmissão (mas dentro dos limites de segurança), melhor sensibilidade do receptor.
- Capacidade Ergódica Normalizada, NEC - fornece o limite superior da capacidade alcançável.
- Probabilidade de Interrupção (*outage*), OP - a probabilidade com que a SNR instantânea fique abaixo de um valor limite pré-calculado.
- Taxa de Sigilo, SR - uma métrica que contabiliza a transferência de informações para receptores legítimos e que pode ser interceptada por um usuário malicioso e ilegítimo.
- Probabilidade de Interrupção de Sigilo, SOP - considera um cenário de ataque passivo, onde o sigilo é comprometido e ocorre uma interrupção.

IV. USO DUAL

Em defesa, a demanda por comunicações em altas taxas e baixa latência tem crescido impulsionada pela maior aplicação de diversas plataformas usadas em logística, monitoramento, controle e coordenação [13], o que apresenta um conjunto significativo de aplicações táticas, aéreas, navais e terrestres (pura ou híbrida com RF) [29]. Métodos de processamento digital de sinais (DSP) permitem implantações confiáveis, de alta capacidade e rápidas, mesmo em situações com nuvens e neblina, com capacidade de gigabits por segundo [23, 24, 30]. Além disso, uma nova geração de soluções para o sistema de apontamento e rastreamento (PAT), essencial para garantir a estabilidade e a eficiência da comunicação, está permitindo cada vez mais o uso operacional de FSO [25-27]. FSO está sendo aproveitada em vários domínios militares devido à sua resiliência a interferências e interceptações [29]:

- Comunicações táticas: *links* seguros dentro da unidade em operações terrestres, aéreas e navais.
- Equipamentos não tripulados: UAVs e drones usam FSOC para *links* de alta taxa de dados e baixa latência.
- Aplicações navais: navio-navio e navio-terra.
- Sensoriamento remoto, LIDAR para detecção de alvos, mapeamento 3D e orientação de mísseis.
- Espaço e Satélite: comunicações espaciais seguras.

Há vários programas de desenvolvimento e produtos na área de sistemas de “conexões FSO plataforma a plataforma”, (implementações de FSO em altas taxas entre plataformas

móveis ou estacionárias, por exemplo, UAVs, satélites, navios ou estações terrestres). Alguns exemplos são:

- Sistema europeu de retransmissão de dados (EDRS), usa satélites GEO e LEO para retransmissão de dados de observação por FSO em tempo real. ESA e Airbus [31].
- Projeto "Platform to Platform Free Space Optical Link" (P2P-FSO), por um consórcio europeu de empresas, financiado pela UE [32]. Concentra-se em LAP.
- DARPA TALON (Tactical Airborne Laser Optical Network), enlaces FSO de alta largura de banda entre aeronaves militares [33, 34].
- DARPA ORCA (Optical RF Communications Adjunct) FSO/RF (híbrido) para *drones* militares [35].
- Sistema FSO comercial Condor Mk3 (Mynaric), para *backhaul* empresarial ou militar de alta velocidade [36].

V. CRIPTOGRAFIA QUÂNTICA NO ESPAÇO LIVRE

O progresso nas novas tecnologias quânticas (TQ) na comunicação, na detecção/metrologia e na computação acelerou acentuadamente nos últimos anos, impulsionado por melhorias em tecnologias de fabricação, detecção e controle, além de avanços na teoria da informação quântica, com novos algoritmos, técnicas e protocolos [37, 38]. As principais áreas são simulação e computação quântica, sensores quânticos e comunicações quânticas, todas consistindo em avanços e capacidades inéditas [39], possibilitadas pelas leis da mecânica quântica e pelas propriedades dos estados quânticos.

Muitas das aplicações dessas novas tecnologias são de utilização dual e se podem esperar impactos em médio prazo. As aplicações militares de TQ não só oferecerão melhorias e novas capacidades, mas também exigirão o desenvolvimento de novas estratégias, táticas e políticas, avaliação de ameaças à paz e segurança globais e identificação de questões éticas. Destaca-se a Distribuição Quântica de Chaves Criptográficas, QKD (*quantum key distribution*), com TRL entre 7 e 8, já com diversos sistemas instalados e expectativa de impacto completo em poucos anos [40]. A QKD utiliza a propagação de fótons em sinais quânticos para estabelecer chaves criptográficas seguras entre duas partes. Vantagens:

- Segurança comprovada (baseada nas leis da física).
- Imunidade a ataques de interceptação, pois qualquer tentativa perturba o sistema, sendo detectável.

FSO é a tecnologia de propagação livre que viabiliza QKD, sendo que cenários práticos entre pontos terrestres são limitados a distâncias de até 10 km. Há no entanto várias demonstrações experimentais de FSO-QKD em distâncias de milhares de quilômetros utilizando conexões entre terra e satélites (ver Fig. 3), em projetos tais como o Micius, da China, e o QKDSat, na Europa. FSO-QKD é uma tecnologia promissora para a criptografia do futuro, permitindo comunicações ultra seguras em escala global, especialmente onde a tecnologia de fibras ópticas não é aplicável ou vantajosa. Com avanços contínuos em óptica adaptativa e detecção quântica, essa abordagem pode se tornar um padrão para redes quânticas internacionais.

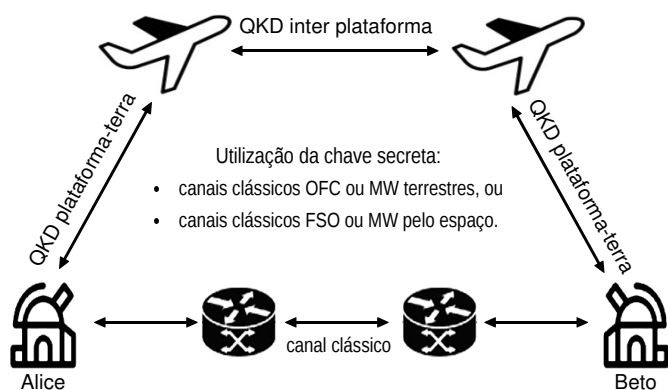


Fig. 3. QKD via HAP, MAP ou LAP. Uma vez que a chave é distribuída de forma segura, a comunicação cifrada pode ocorrer por canais clássicos terrestres ou aeroespaciais (figura baseada em [41]).

Em 2025, foi publicado o desenvolvimento de um microssatélite quântico com carga útil de 23 quilos capaz de realizar a distribuição de chaves quânticas do espaço para a Terra usando estações terrestres portáteis de cerca de 100 quilos, o qual alcançou o compartilhamento de até 1,07 milhão de bits de chaves seguras durante uma única passagem. Com comunicação óptica bidirecional (clássica e quântica), demonstrou destilação de chaves e comunicação segura em tempo real, em locais separados por mais de 12.900 km (entre China e África do Sul) [42].

VI. PROPOSTAS DE ESTUDOS NO ITA

O Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, conta em sua Divisão de Engenharia Eletrônica com o Centro de Competência em Guerra Eletrônica (CCGE) [43], sendo este uma importante referência nacional em pesquisa acadêmica nas áreas de fotônica, materiais e sistemas em RF, sensores e comunicação segura. O ITA possui importantes competências para atuar nesse campo transversal e uma cultura de dedicação a projetos aplicados, os quais poderão atender a demandas da sociedade brasileira. Está sendo criado no CCGE um laboratório de pesquisa experimental em implementações fotônicas de TQ, que será denominado *Espaço ITA de Tecnologias Quânticas (EQ)*, que contará com instrumentação em sistemas de criptografia quântica comerciais, operando em dois protocolos selecionados e com recursos específicos para atividades acadêmicas, permitindo a realização de práticas didáticas, de pesquisa em nível de pós-graduação e testes operacionais. Irá também propiciar o fomento a novas atividades de ensino em Engenharia Quântica no ITA, novas disciplinas e novos programas. De caráter multiusuário, permitirá apoio a projetos de outras ICTs e empresas, assim contribuindo para o aumento da inovação tecnológica e do desenvolvimento nacional.

Os sistemas QKD no EQ terão capacidade de operar em links de fibra óptica de até 100 km, são estabilizados em 1552 nm, terão taxas de chave secreta de alguns kbps, e dispõem de software de acompanhamento, controle e aquisição, versão para academia. Permitirão acesso às chaves brutas, testes “quantum BER” e topologia de configuração de rede QKD, além de contarem com API de programação.

Disporão de simulador de escuta (*eavesdropping*), para testes de segurança. Utilizam cabos ópticos padrão, conectorizados.

Será realizado no EQ um sistema FSO-QKD com alcance de 30 m. Neste, será implementada montagem para testes e ensaios em escala de performance da comunicação QKD sob vários efeitos atmosféricos, turbulência, névoa e outros.

O CCGE-ITA inicia um programa de desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV) e o Instituto de Aplicações Operacionais (IAOp), ambos da Força Aérea Brasileira, em um plano de trabalho que propõe entregas de protótipos e produtos duais em FSO e FSO-QKD. Outras colaborações acadêmicas relevantes são: Radaz Ind. Com. Prod. Eletron., *Quantum Structured Light Laboratory* (QSLab – IFUSP), e SENAI CIMATEC.

VII. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Os sistemas FSO estão sendo utilizados em diversos domínios civis e militares, incluindo sistemas aéreos, terrestres e marítimos, em projetos e aplicações comerciais e governamentais. Em nossa visão, o Brasil necessita rapidamente desenvolver conhecimento e competência em FSO clássica e também em FSO-QKD, no contexto de plataformas móveis de várias altitudes (o que aponta para o necessário papel da Força Aérea Brasileira neste processo), para dispor de tecnologia e equipamentos adequados às novas necessidades operacionais na manutenção da integridade nacional, na garantia da segurança e no apoio à população, considerando, especialmente, as características do território brasileiro, seus recursos naturais e sua extensa faixa de fronteira.

A abrangência e a interdisciplinaridade dessa tarefa são enormes, exigindo o domínio do conhecimento, da tecnologia, a formação de engenheiros nessa nova área, além de incentivar o desenvolvimento de uma nova estrutura produtiva nacional baseada nessa tecnologia.

REFERÊNCIAS

- [1] SAKAMOTO, Bráulio Fernando R; FEGADOLLI, Willian; OLIVEIRA, José Edimar Barbosa. Emprego Militar de Comunicação Óptica em Espaço Livre – FSO. In: SIGE 2007. [S. l.: s. n.], 2007.
- [2] KAUSHAL, Hemani; JAIN, V.K.; KAR, Subrat. Free Space Optical Communication. New Delhi: Springer India, 2017. (Optical Networks).
- [3] MEASURES, Raymond M. Laser remote sensing: fundamentals and applications. Malabar, Fla: Krieger Pub. Co, 1992.
- [4] FAROOQ, Essar; SAHU, Anupam; GUPTA, Sachin Kumar. Survey on FSO Communication System—Limitations and Enhancement Techniques. In: JANYANI, Vijay et al. (org.). Optical and Wireless Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2018. (Lecture Notes in Electrical Engineering). v. 472, p. 255–264.
- [5] AL-ALLAQ, Zaid Jabbar; SHAKIR, Wafaa M. R.; CHARAFEDDINE, Jinan. A Comprehensive Review of Cutting-Edge Disaster Response: UAVs Equipped with FSO-Based Communications. Wireless Personal Communications, [s. l.], 2025.
- [6] TBRC. Global Free Space Optics (FSO) Market Size Forecast 2024 - 2033. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/market-insights/free-space-optics-fso-global-market-report-2024>
- [7] LASER COMMUNICATIONS RELAY DEMONSTRATION. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://tempo.gsfc.nasa.gov/projects/LCRD>

- [8] MRIGAKSHI DIXIT. 5x faster than Starlink: Chinese satellite beams data with minimal laser power. [S. l.], [s. d.]. 2025. Disponível em: <https://interestingengineering.com/innovation/china-satellite-laser-communication>.
- [9] CHINA-ARMS. China Surpasses Elon Musk's Starlink with Breakthrough in 100Gbps Satellite-to-Ground Laser Communication. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.china-arms.com/2025/01/china-satellite-to-ground-laser-communication/>
- [10] SINGH, Mehtab. Enhanced Performance Analysis of Inter-aircraft Optical Wireless Communication Link (IaOWC) Using EDFA Pre-amplifier. *Wireless Personal Communications*, [s. l.], v. 97, n. 3, p. 4199–4209, 2017.
- [11] MOLL, Florian et al. Demonstration of high-rate laser communications from fast airborne platform: flight campaign and results. In: *SPIE SECURITY + DEFENCE*, 2014, Amsterdam, Netherlands. (Edward M. Carapezza, Panos G. Datskos, & Christos Tsamis, Org.). Amsterdam, Netherlands: [s. n.], 2014. p. 92480R.
- [12] NASA ALCT. NASA Airborne Laser Communication Testbed (ALCT). [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.nasa.gov/glenn/research/airborne-laser-communication-testbed>
- [13] NZEKWU, Nwanze J. et al. A Comprehensive Review of UAV-Assisted FSO Relay Systems. *Photonics*, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 274, 2024.
- [14] URSIN, R. et al. Entanglement-based quantum communication over 144 km. *Nature Physics*, [s. l.], v. 3, n. 7, p. 481–486, 2007.
- [15] FSONA SYSTEMS CORP. SONAbeam®. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.fsona.com/product.php?sec=1250ep>
- [16] WIRELESS EXCELLENCE LIMITED. CableFree UNITY. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.cablefree.net/unity/>.
- [17] HEARNE, Shane et al. Wavelength Selection for Satellite Quantum Key Distribution. *Applied Sciences*, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 1308, 2025.
- [18] RICKLIN, Jennifer C.; DAVIDSON, Frederic M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication. *Journal of the Optical Society of America A*, [s. l.], v. 19, n. 9, p. 1794, 2002.
- [19] RICKLIN, Jennifer C. et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication. In: MAJUMDAR, Arun K.; RICKLIN, Jennifer C. *Free-Space Laser Communications*. New York, NY: Springer New York, 2006. p. 9–56.
- [20] ANBARASI, K.; HEMANTH, C.; SANGEETHA, R.G. A review on channel models in free space optical communication systems. *Optics & Laser Technology*, [s. l.], v. 97, p. 161–171, 2017.
- [21] KHALIGHI, Mohammad Ali; UYSAL, Murat. Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 2231–2258, 2014.
- [22] ANDREKSON, Peter. High-sensitivity receivers for free-space optical transmission links. In: *13th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. Porto, Portugal: IEEE, 2022. p. 679–681. Disponível: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9907916/>.
- [23] AL-GAILANI, Samir Ahmed et al. A Survey of Free Space Optics (FSO) Communication Systems, Links, and Networks. *IEEE Access*, [s. l.], v. 9, p. 7353–7373, 2021.
- [24] WU, Yan et al. Performance Analysis of UAV-Assisted Hybrid FSO/RF Communication Systems under Various Weather Conditions. *Sensors*, [s. l.], v. 23, n. 17, p. 7638, 2023.
- [25] KAYMAK, Yagiz et al. A Survey on Acquisition, Tracking, and Pointing Mechanisms for Mobile Free-Space Optical Communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 1104–1123, 2018.
- [26] MILAŠEVIČIUS, Martynas; MAČIULIS, Laurynas. A Review of Mechanical Fine-Pointing Actuators for Free-Space Optical Communication. *Aerospace*, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 5, 2023.
- [27] ABDELFAH, Reham; ALSHAER, Nancy; ISMAIL, Tawfik. A review on pointing, acquisition, and tracking approaches in UAV-based fso communication systems. *Optical and Quantum Electronics*, [s. l.], v. 54, n. 9, 2022.
- [28] GUPTA, Aanchal; DHAWAN, Divya; GUPTA, Neena. Review on UAV-based FSO links: recent advances, challenges, and performance metrics. *Optical Engineering*, [s. l.], v. 63, n. 04, 2023.
- [29] KUMAR, Suresh; SHARMA, Nishant. Emerging Military Applications of Free Space Optical Communication Technology: A Detailed Review. *Journal of Physics: Conference Series*, [s. l.], v. 2161, n. 1, p. 012011, 2022.
- [30] VERBERK, Joost. Free-space optics surpasses traditional technology. *Laser Focus World*, [s. l.], p. 3, 2022.
- [31] EUROPEAN SPACE AGENCY. Sistema Europeu de Retransmissão de Dados (EDRS). [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/EDRS.
- [32] P2P-FSO. Platform To Platform Free Space Optical Link. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://p2pfsou.eu/>.
- [33] CASEY, Charles et al. Suitability of free space optical communication in military environments. [S. l.]: Naval Postgraduate School, 2015. <https://calhoun.nps.edu/server/api/core/bitstreams/4079f20a-9752-42fc-a72d-e7df69a692/content>.
- [34] GARRETT REIM. DARPA's Aerial Laser Network Could Power Autonomous Warfare. [s. l.], 2025. Disponível em: <https://aviationweek.com/defense/budget-policy-operations/darps-aerial-laser-network-could-power-autonomous-warfare>.
- [35] DAVID W. YOUNG et al. Development and Demonstration of Laser Communications Systems. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, [s. l.], v. 33, n. 2, 2015.
- [36] MYNARIC. Condor Mk3 - Optical Communication Terminal for Space-Based Applications. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://mynaric.com/fair/condor-mk3/>
- [37] LLOYD, Seth; ENGLUND, Dirk. Future Directions of Quantum Information Processing. *VT-ARC*. [S. l.]: Virginia Tech, 2017.
- [38] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop: Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop. [S. l.]: s. n., 2020. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/QuantumWkshpRpt20FINAL_Nav_0.pdf.
- [39] GIBNEY, Elizabeth. Quantum gold rush: the private funding pouring into quantum start-ups. *Nature*, [s. l.], v. 574, n. 7776, p. 22–24, 2019.
- [40] KRELINA, Michal. Quantum technology for military applications. *EPJ Quantum Technology*, vol. 8, no. 1, p. 24, 6 Dec. 2021. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y>.
- [41] WANG, Jing; HUBERMAN, Bernardo A. A Guide to the Deployment of Global Quantum Key Distribution Networks. In: ARAI, Kohei (org.). *Advances in Information and Communication*. Cham: Springer International Publishing, 2022. (Lecture Notes in Networks and Systems). v. 439, p. 571–586.
- [42] LI, Yang et al. Microsatellite-based real-time quantum key distribution. *Nature*, [s. l.], v. 640, p. 47–54, 2025.
- [43] LAB-GE, Laboratório de Guerra Eletrônica, <https://www.ele.ita.br/~labge/>