

Sensoriamento Remoto Quântico aplicado na Defesa Nacional

Jullyano Lino¹, Ines Brosso²

^{1,2}Anima Educação — Hub. Computação Quântica — Universidade São Judas Tadeu — São Paulo—SP. Brazil

Resumo — Este trabalho apresenta um estudo sobre sensoriamento remoto quântico aplicado na defesa nacional utilizando as tecnologias RADAR (*Radio Detection and Ranging*) e LIDAR (*Light Detection and Ranging*) que podem ser adotadas em processos de metrologia e sensoriamento remoto, capazes de detectar e interceptar alvos em uma determinada área de abrangência. Nesse contexto, o trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica abordando conceitos, princípios da mecânica quântica, configurações básicas, métodos de emaranhamento de fótons, projetos, experimentos e aplicações potenciais de sistemas de RADAR e LIDAR, destacando vantagens e aspectos, como velocidade, maior precisão, menor custo, maior garantia de segurança, maior sensibilidade e resolução de operação de sensoriamento remoto quântico, assim como desafios associados: a perda de fótons, as dificuldades técnicas, o fenômeno da decoerência, a sensibilidade ao ruído e a necessidade de integração de sistemas de sensoriamento remoto quântico com módulos de correção de erros quânticos.

Palavras-Chave — RADAR, LIDAR, Tecnologias de Defesa.

I. INTRODUÇÃO

Em um cenário de defesa nacional cada vez mais complexo e em rápida evolução, tecnologias militares de ponta, como aquelas que utilizam princípios da mecânica quântica, surgem para extrapolar e potencializar capacidades clássicas e desempenham um papel fundamental na garantia de vantagem estratégica em segurança, inteligência e contrainteligência. Este novo paradigma tem o potencial de revolucionar vários setores de defesa, desde segurança cibernética, comunicação, criptografia e, até, metrologia e sensoriamento remoto [9].

O campo de pesquisa de sensoriamento remoto, ferramenta essencial nas estratégias de defesa modernas, obteve avanços significativos nos processos de alcance, resolução e sensibilidade com o advento dos sistemas de RADAR (*Radio Detection and Ranging*) e de LIDAR (*Light Detection and Ranging*), utilizados para detectar, localizar e classificar objetos em distâncias variadas, fornecendo dados valiosos para a tomada de decisões estratégicas e táticas em operações de defesa [3].

Na última década, a integração dos princípios quânticos, especialmente o fenômeno do emaranhamento quântico apresentado pela primeira vez em 1935 [1], no sensoriamento remoto surgiu como um recurso promissor de pesquisa e desenvolvimento em projetos de sistemas de RADAR e LIDAR, apropriadamente adjetivados como “quânticos”, uma vez que viabilizam a detecção de alvos em ambientes ruidosos, com refinada resolução, e, ao mesmo tempo, apresentam potenciais recursos contra a eventual capacidade de furtividade de alvos — características altamente desejáveis em aplicações de defesa [4].

O objetivo deste trabalho é apresentar uma pesquisa bibliográfica sobre sensoriamento remoto quântico como uma tecnologia quântica para a defesa por meio da consolidação, análise e síntese de referências atuais que abordam adaptações quânticas e avanços em sistemas de RADAR e de LIDAR quânticos.

O resultado esperado é uma pesquisa sobre conceitos e princípios da mecânica quântica, configurações básicas, métodos, projetos, experimentos e aplicações potenciais associadas, bem como as vantagens e desafios pertinentes, com destaque ao estado da arte e a possíveis apontamentos de trabalhos futuros em tal campo promissor e crítico para a segurança e defesa nacionais.

II. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia condutora deste trabalho foi a pesquisa referenciada de modo a garantir uma visão abrangente, relevante e atualizada da aplicação da tecnologia quântica no sensoriamento remoto para defesa, nas adaptações quânticas e nos avanços de sistemas de RADAR e LIDAR, baseada em:

- Seleção e exploração em bancos de dados de pesquisa, incluindo IEEE Xplore, Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink e JSTOR, e utilizando parâmetros de consulta personalizados e termos relacionados;
- Critérios de filtros baseados em data de publicação (priorizando a última década), relevância (sensoriamento remoto quântico para defesa) e revisão por pares;
- Extração de dados com destaque para as principais descobertas, contribuições, desafios, limitações e sugestões de pesquisas futuras.
- Análise sistemática dos dados extraídos e síntese coerente na consolidação, comparação e estrutura dos resultados e;
- Validação cruzada das referências de modo a ratificar a relevância e exploração de trabalhos potencialmente ignorados.

III. CONCEITOS E CONTEXTUALIZAÇÃO

A mecânica quântica é a teoria que descreve o comportamento da matéria e da energia no nível subatômico e apresenta fundamentação rigorosa para princípios como superposição e emaranhamento [8]. A superposição postula que um sistema quântico pode existir em vários estados simultaneamente, resolvendo apenas para um estado definido imediatamente após a medição [6]. O emaranhamento, por

outro lado, é um fenômeno quântico em que as partículas se tornam correlacionadas de tal maneira que a observação do estado de uma partícula implica estabelecer instantaneamente o estado da outra, independentemente da distância que as separa [5].

A organização e a utilização de tais princípios, em sistemas computacionais, promete um poder de processamento de informações sem precedentes [13]. Enquanto os computadores clássicos operam com *bits* — representados pelos valores 0 (zero) ou 1 (um) —, os computadores quânticos manipulam bits quânticos ou *qubits* (*quantum bits*, as unidades de informação quântica), que podem estar em uma superposição de ambos os estados simultaneamente, permitindo que eles executem um grande volume de cálculos simultaneamente [2]. Esse paralelismo é fundamental para problemas considerados intratáveis para computadores clássicos, como algoritmos de fatoração de grandes números ou simulação de sistemas quânticos complexos [8].

A Tecnologia Quântica (TQ) é um campo emergente da física e da engenharia baseado em propriedades da mecânica quântica, especialmente emaranhamento, superposição e tunelamento, que desenvolve aplicações práticas com um propósito dual de produção comercial e de operações de defesa. Sendo assim, ela está no rol de interesses de atores diversos, como organizações militares, governos e organizações pacificadoras [9].

Pela sua natureza, tecnologias que exploram e instrumentalizam propriedades fundamentais da mecânica quântica são suscetíveis a interferências, ruídos ou falsificações. Nesse sentido, esforços de pesquisa e desenvolvimento de procedimentos de detecção e correção de erros quânticos, de manutenção da coerência dos estados quânticos e de garantia da fidelidade de portas lógicas quânticas constituem os principais desafios ao objetivo de aprimoramento da qualidade dos *qubits* [8].

Conforme a referência [10], os resultados oriundos da TQ podem ser categorizados em três áreas de concentração:

- a) computação quântica (computadores, simuladores, sistemas de criptoanálise e sistemas de Inteligência Artificial que superam suas contrapartes clássicas);
- b) comunicação quântica (distribuição quântica de chaves criptográficas e distribuição de *qubits* emaranhados) e;
- c) sensoriamento quântico (medida e monitoramento de variáveis físicas, como campos magnéticos ou elétricos, gradientes de gravidade, rotações de aceleração e tempo).

A. Tecnologias Quânticas para defesa

No domínio da Defesa Nacional, quanto maior o uso de efetivas tecnologias inovadoras, melhor é o desempenho e maior é a preparação para o alcance dos objetivos esperados em operações militares. Nesse contexto, as implicações potenciais da TQ para defesa nacional e segurança vêm se consolidando como uma das principais iniciativas emergentes e disruptivas que trará novas capacidades para fins civis e militares.

Atualmente, existem vários grupos de pesquisa em universidades, no mundo todo, comprometidos com a

temática, que exercem o papel de protagonistas no desenvolvimento de pesquisas inéditas na área da computação quântica (hardware, algoritmos, protocolos, comunicação, etc.) e pós-quântica (protocolos de criptografia, por exemplo). No âmbito corporativo, pode-se citar a IBM Google, Microsoft, D-WAVE e Righetti, sediadas nos Estados Unidos, Canadá, China e Europa, que atendem aos interesses da indústria, de empresas e de governos em todo o planeta através de pesquisas quânticas aplicadas [2].

A referência [9] relaciona os baixos Níveis de Prontidão Tecnológica (NPT) — variando numericamente de 1 a 8 — com as atuais tecnologias quânticas e seu horizonte de tempo, a despeito de seu disruptivo potencial emergente de conduzir e definir o sucesso de no alcance dos objetivos da defesa nacional.

TABELA I. EXPECTATIVAS DE NÍVEIS DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA (NPT) E DE HORIZONTE DE TEMPO

Tecnologia	NPT	Horizonte de Tempo
Computador quântico (<i>annealer</i>)	4-5 (5-6)	2030
Distribuição de chave quânticas (satélite)	7-8 (6-7)	2025 (2030)
Criptografia pós-quântica	7-8	2025
Redes quânticas de comunicação	1-3	2030-2035
Navegação inercial quântica	4-5	2025-2030
Relógios quânticos	4-6	2030
Radar quântico	1-2	N/A
Antena quântica de radiofrequência	4	2025-2030
Sensoriamento quântico de magnetismo e gravidade	5-6	2025
Sensoriamento quântico de imagens	5	2025-2030

O conceito de “guerra quântica” (*quantum warfare*) é concebido como o uso de tecnologias quânticas em aplicações militares que abrange capacidades de inteligência, segurança e defesa em todos os domínios de guerra suscitando novas estratégias, doutrinas e cenários militares, além de questões éticas e pacificadoras [23].

O principal palco desse conceito é representado pelos canais quânticos, definidos como qualquer fluxo de fótons que transporta *qubits* em uma rede quântica, em sistemas de RADAR quânticos ou em outros sistemas similares que usufruem do espaço livre ou de cabeamento por fibras ópticas como meio de comunicação [10].

Diante, porém, da ausência de uma precisa noção de eficácia ou impacto, mas com iminente implantação em aplicações reais, os autores destacam a relevância de se discutir também, métodos e técnicas de falsificação, desabilitação ou destruição de tais artefatos, como contra-ataque (*quantum hacking*) ou contramedidas no contexto de operações de campo imersas nessa nova realidade.

Conforme a referência [9], a “guerra quântica” (*quantum warfare*) pode ser viabilizada por:

- a) sistemas de guerra dotados de tecnologias clássicas aprimoradas por antenas quânticas e computadores quânticos analisadores de espectros de radiofrequência por meio do uso

de técnicas de otimização e aprendizado de máquinas quânticos e;

b) sistemas quânticos puros dotados de Inteligência de Sinais (SIGINT — *signals intelligence*), de Inteligência de Comunicação (COMINT – *communications intelligence*) para detecção, interceptação, identificação e localização, além de capacidades de ataques eletrônicos quânticos (bloqueio, engano, uso de armas de energia direta).

A Fig. 1 ilustra o conceito de “guerra quântica” (*quantum warfare*) por meio das possíveis aplicações de sistemas de defesa baseados em tecnologias quânticas no contexto de operações militares [10].



Fig. 1. Conceito de “guerra quântica” (*quantum warfare*). Esquema da aplicação de sistemas baseados em tecnologias quânticas em operações militares [10].

No campo de estudo de sensoriamento remoto quântico, fenômenos como a iluminação quântica exploram o emaranhamento para melhorar o procedimento de detecção de sinais fracos em ambientes ruidosos [4]. Da mesma forma, o potencial para sistemas LIDAR e RADAR com aprimoramentos surge da alavancagem desses princípios quânticos [11], visando o desenvolvimento de propriedades como resolução, sensibilidade e segurança aperfeiçoadas em aplicações de detecção e alcance [7].

B. Sensoriamento Remoto para Defesa

Historicamente, o sensoriamento remoto para defesa foi predominantemente dominado por aeronaves e satélites de reconhecimento, coletando imagens visuais e infravermelhas de várias regiões [12].

O sensoriamento remoto é uma ferramenta para defesa e oferece uma combinação de vigilância em larga escala e reconhecimento detalhado de alvos a partir da utilização de ondas eletromagnéticas que viabiliza a detecção e classificação de objetos, além de aprimorar a consciência situacional, a coleta de inteligência e o planejamento estratégico de operações de defesa nacional [11]. Tradicionalmente, o sensoriamento remoto é aplicado para defesa sob as seguintes abordagens:

- Vigilância e reconhecimento: monitoramento contínuo de áreas de interesse, fornecendo dados sobre movimentos, instalações e atividades inimigas;
- Reconhecimento de alvos: identificação precisa de potenciais ameaças ou alvos com base em suas assinaturas;
- Mapeamento de terreno: geração de mapas topográficos detalhados que são cruciais para o planejamento de missões, especialmente em terrenos desconhecidos e;
- Defesa contra mísseis: rastreamento e interceptação de ameaças recebidas usando detecção de alta resolução.

O sensoriamento remoto quântico é uma das áreas de tecnologia quântica cujo surgimento foi impulsionado por avanços como o desenvolvimento dos relógios quânticos do GPS (*Global Positioning System*) e sensores quânticos capazes de produzir informações precisas sobre sinais elétricos, sobre anomalias magnéticas e sobre dados necessários na navegação inercial [12].

C. RADAR & LIDAR Quânticos

Os protocolos da óptica quântica que relacionam o emaranhamento de fótons a ponto de viabilizar a supressão de ruído e resolução dos objetos são utilizados em sistemas de RADAR quânticos detectando objetos em ambientes opticamente impermeáveis [4].

Portanto, trata-se de um campo de pesquisa que tem o potencial de alavancar, significativamente, os investimentos em recursos de defesa, fornecendo vantagens inigualáveis em detecção, resolução e segurança.

O advento dos sistemas RADAR (*Radio Detection and Ranging*) e LIDAR (*Light Detection and Ranging*) marcou um salto tecnológico significativo, pois, usando ondas de rádio e ondas de luz, respectivamente, esses sistemas oferecem a vantagem de operação diurna e noturna, com penetração através de certas oclusões e capacidade de capturar tipos específicos de dados, como velocidade por meio da análise dos resultados provenientes do Efeito Doppler [9].

A aplicação dos princípios quânticos aos sistemas de RADAR e de LIDAR promete uma nova fronteira nas capacidades de sensoriamento remoto, tais como:

- Sensibilidade aprimorada: os sistemas quânticos, inerentemente, são mais sensíveis que os sistemas clássicos, permitindo a detecção de alvos de baixa assinatura em ambientes ruidosos [3].
- Resolução aprimorada: o emaranhamento quântico e estados quânticos específicos (como estados NOON) podem permitir resoluções além do limite clássico de difração [14];
- Precisão: como consequência das capacidades anteriores, em resposta a mínimas alterações no ambiente considerado, os sistemas de RADAR e de LIDAR são ideais para detectar ou rastrear ameaças, como armas químicas, biológicas e nucleares [23] e;

- **Segurança:** sinais quânticos podem ser inerentemente seguros, e qualquer tentativa de interceptação ou espionagem perturbaria os estados quânticos, tornando a detecção evidente [12].

É importante, portanto, destacar alguns desafios e considerações enfrentadas em tal campo de pesquisa, conforme expresso em [23]:

- **Perda de fótons:** um problema significativo nos sistemas de RADAR e de LIDAR quânticos, especialmente em longas distâncias ou em ambientes desafiadoramente ruidosos;
- **Desafios técnicos:** procedimentos de criação, gerenciamento e detecção de estados quânticos específicos de luz, especialmente em um ambiente externo, apresentam desafios técnicos significativos eminentemente associados à manutenção da qualidade da informação processada;
- **Decoerência:** estados quânticos são delicados e podem ser facilmente corrompidos pelo ambiente, levando a uma perda de vantagem quântica e;
- **Integração de sistemas quânticos na infraestrutura de defesa estabelecida** requer consideração cuidadosa (temperatura, correção de erros, etc.), diante dos singulares requisitos e graus de sensibilidade das unidades de informação manipuladas.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 2 exibe dois esquemas de detecção de alvo: clássico e quântico [4].

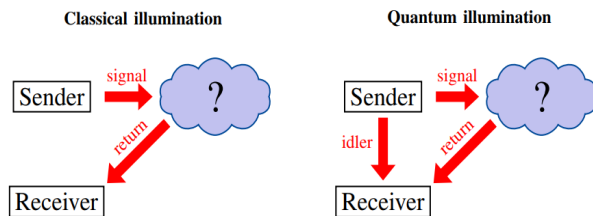


Fig. 2. Esquemas de detecção de alvo clássica (*Classical illumination*) e de detecção baseada em emaranhamento quântico (*Quantum illumination*) [4].

No cenário clássico de iluminação como procedimento de detecção, envia-se um estado coerente para a região alvo e medimos a luz retornada, que está em uma configuração térmica forte ou em uma combinação de um estado coerente muito fraco e outro muito mais forte. Nesse esquema, o processo de discriminação das duas hipóteses corresponde a distinguir entre uma distribuição gaussiana muito ampla e uma idêntica a qual é ligeiramente deslocada em relação à primeira.

No cenário de iluminação quântica para detecção, produzimos um estado de vácuo comprimido de dois modos e retemos um sinal (*Idler*) no remetente, enquanto transmitimos

o sinal para a região alvo. Para decidir qual das duas hipóteses é a verdadeira, realiza-se uma medição conjunta no sinal de retorno e no sinal retido (*Idler*). Por medição conjunta, queremos dizer um esquema de detecção que aborda o sinal e o usuário juntos como um único sistema quântico capaz de aferir suas correlações. Medir individualmente o sinal retornado e o retido não é suficiente para reconstruir suas correlações no pós-processamento.

A Fig. 3 exibe um esquema de LIDAR, comercialmente disponível e amplamente utilizado, onde um pulso de *laser* (*light amplification by stimulated emission of radiation*) é dividido em um grande número de feixes estreitos que se propagam em direção ao alvo e um conjunto de detectores registra o sinal de retorno permitindo a coleta de estatísticas dos dados das características do objeto que podem, então, ser inferidas [3].

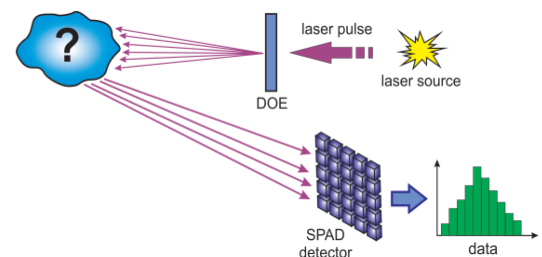


Fig. 3. Esquema de LIDAR com matriz de detector de fóton único: o feixe de *laser* é dividido em feixes por um elemento óptico difrativo (DOE — *diffractive optical element*) e o sinal de retorno é gerado com diodos de avalanche de fóton único (SPAD — *single-photon avalanche diodes*) [3].

Tal esquema oferece vantagens, como alta sensibilidade, possibilidade de usar fontes de *laser* mais fracas, segurança ocular, baixo custo, desempenho de cobertura de área potencialmente maior, resolução de profundidade aprimorada e precisão [7]. Todavia, ele exige a necessidade de alto poder de computação e métodos avançados para a reconstrução de objetos e remoção de ruído, especialmente se o objetivo for a captura de imagens em tempo real de alvos em movimento. Estima-se que os sistemas de LIDAR de fóton único são capazes de alcançar um aumento duplo da resolução espacial acima do limite de difração para distâncias de mais de 8 km [3].

Uma outra aplicação possível de RADAR quântico são transmissões com rádio quântico em embarcações submarinas a partir da manipulação do campo magnético do elemento químico Rubídio (Rb) de modo a enviar sinais digitais [2].

No âmbito do cenário militar brasileiro, onde os planejamentos estratégicos e operacionais preconizados pela Política Nacional de Defesa (PND) e pela Estratégia Nacional de Defesa (END), são orientados, conforme esforços do Ministério da Defesa junto às três Forças Armadas, pela metodologia de Planejamento Baseado em Capacidades (PBC), considerações orçamentárias ante a restrições e orientações políticas ante o emprego do Poder Militar constituem a base metodológica para o planejamento

estratégico, por exemplo, do Comando da Aeronáutica (COMAER) [15].

Com efeito, algumas fases desse processo, como as análises prospectivas de inteligência, tecnológica e industrial e de recursos financeiros e orçamentários visam embasar, dentre outras ações, a alocação de recursos às aquisições ou desenvolvimento estrategicamente diagnosticados (capacidades) [15]. Por isso, para o setor de defesa, análises das tendências de mercado a respeito de sensores quânticos, ilustradas pela Fig. 4, e pesquisas de preços, exemplificadas de forma demonstrativa na Tabela II, são atividades indissociáveis às iniciativas e ações puramente táticas e operacionais ou estritamente técnicas previamente abordadas.

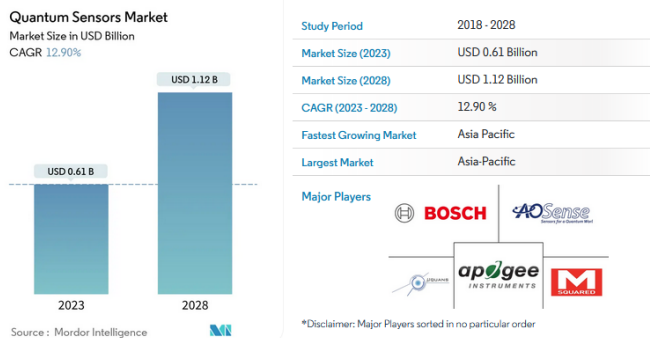


Fig. 4. O tamanho do mercado de sensores quânticos está estimado em US\$ 0,61 bilhão em 2023, e deve atingir aproximadamente US\$ 1 bilhão até 2028, crescendo a uma taxa de crescimento anual composta de 12,90% durante o período de previsão (2023-2028). Grande parte de tais investimentos advém do setor de defesa em função da precisão e sensibilidade de detecção de submarinos e de estruturas subterrâneas e materiais nucleares [16].

A Tabela II compara, de forma referencial, o valor médio (em dólar americano — USD) de sensores clássicos e quânticos facilmente encontrados à venda na Internet para usos civis e de propósito geral [17]-[22]. Essa exemplificação demonstra a fundamental relevância desta categoria de análise na estruturação do potencial estratégico do poderio militar brasileiro a partir da perspectiva de capacidades envolvendo irremediavelmente a atividade de prospecção no mercado de equipamentos de sensoriamento quântico perante a realidade orçamentária do país.

TABELA II. COMPARAÇÃO REFERENCIAL DE VALORES DE AQUISIÇÃO DE SENSORES CLÁSSICOS E QUÂNTICOS SELECIONADOS POR AMOSTRAGEM [17]-[22].

Sensor Clássico	Valor (US\$)	Sensor Quântico	Valor (US\$)
7210 Davis AirLink Professional Air Quality Sensor	215.00	Apogee Quantum Meter MQ-210	538.80
6450 Davis Solar Radiation Sensor	225.00	Apogee SQ-520 Quantum Sensor	653.25
Davis 6332 Solar-Powered Wireless Sensor Transmitter	235.00	SQ-515 Amplified 0-5 V Full-Spectrum Quantum Sensor	699.00

Portanto, além dos desafios inerentemente técnicos, a implantação de sensores quânticos apresenta desafios orçamentários. Pois, apesar dos baixos custos de operação em

relação às suas contrapartes clássicas, os custos de aquisição de soluções tecnológicas para defesa e segurança nacionais podem ser proibitivos [23]. Além disso, alguns sistemas de RADAR e de LIDAR quânticos exigem operação sob temperaturas próximas do zero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou 0 K) com o propósito de garantir a precisão e sensibilidade corretas no processo de detecção, um desafio significativo para operações militares.

V. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTUROS

Apesar das, ainda, incipientes referências sobre aplicação de princípios de mecânica quântica em sensores remotos e sua utilização de RADAR e LIDAR como tecnologia quântica para a defesa nacional, entende-se que é uma grande área de pesquisa e que inovações nos campos de computação quântica, fotônica, e Inteligência Artificial irão acelerar novas interpretações, simulações, aprimoramentos e superações dos inerentes desafios em sua aplicabilidade prática, conforme previsto em trabalhos recentes [12].

Portanto, no contexto de segurança e defesa nacionais, as principais aplicações dessa área de pesquisa estão no campo de IVR (Inteligência, Vigilância e Reconhecimento) e PNC (Posicionamento, Navegação e Cronometragem) [11]. O RADAR quântico poderia, em princípio, aumentar o alcance máximo de suas contrapartes clássicas em 41% e se configurarem particularmente eficazes contra aeronaves furtivas [9].

No curto prazo, a tecnologia de sensoriamento de imagem fantasma (*ghost imaging*) poderia melhorar as aplicações relacionadas ao campo de IVR superando barreiras atmosféricas como nuvens ou fumaça. Relógios atômicos sensíveis poderiam melhorar o posicionamento baseado em GPS e magnetômetros e radiômetros poderiam permitir a navegação em ambientes não cobertos por GPS através dos campos magnéticos da Terra. Os acelerômetros poderiam melhorar os sistemas de navegação inercial, incluindo aqueles que integram mísseis guiados e outras aplicações críticas do campo de PNC [11].

Conforme é afirmado na referência [11], o conselho consultivo científico da Força Aérea norte-americana (*Air Force Scientific Advisory Board*) concluiu, ainda em 2015, que apenas um intenso processo sustentado de pesquisa e desenvolvimento de tais tecnologias pode amadurecer, no longo prazo, sua aplicação em operações militares.

Destaca-se, também, que o conceito de “guerra quântica” cria demandas estratégicas, táticas e doutrinárias de ordem militar, bem como provocações técnicas (nova engenharia de aplicações em ambientes reais, crescimento exponencial de dados, nova arquitetura e infraestrutura computacional, questões de padronização, comunicação segura e confiável, educação e formação de força de trabalho, dentre outras), além de questões éticas (ameaças diretas contra o DNA humano, novos materiais como armas, etc.) e desarmamentistas (geração e controle de exportação de novas armas e gestão do uso dual da tecnologia que pode ser usada tanto para aplicações civis quanto para operações militares). Estudos e discussões globais devem ser conduzidos com o

intuito de se compreender as reais implicações, ameaças e escolhas que surgem a partir de tal proposição.

Como proposta de trabalhos futuros, tendo em vista a sinergia entre diversas áreas de pesquisa brasileiras, tais como Meteorologia, Física e Astronomia, além também da troca de experiência com vários setores da Defesa Militar no Brasil (radares), pode-se conceber projetos de engenharia do campo híbrido, civil e militar, criando dispositivos quânticos para detecção e rastreamento de corpos celestes por meio do uso de gravimetria [12]. Esses sistemas podem operar com sistemas ópticos (dotados de *laser*) ou com a provisão de sistema de emissão/detecção de ondas eletromagnéticas em outros espectros. Destaca-se, por fim, a possibilidade de pesquisas sobre aplicações de sistemas de RADAR e de LIDAR quânticos no desenvolvimento de soluções de transmissões com rádio quântico, nas atividades de vigilância e de coleta de dados, na condução de operações antiterroristas e no projeto de sistemas de defesas contra mísseis [23].

REFERÊNCIAS

- [1] A. Einstein, B. Podolsky, e N. Rosen, "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?," *Phys. Rev.*, vol. 47, pp. 777–780, 1935.
- [2] C. Falbriard, I. Brosso, "Computação quântica — uma nova era!", Editora Alta Books, 2020.
- [3] G. Slepian, S. Vlasenko, D. Mogilevtsev e A. Boag, "Quantum Radars and Lidars: Concepts, realizations, and perspectives", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 64, no. 1, pp. 16-26, 2022.
- [4] G. Sorelli, N. Treps, F. Grosshans e F. Boust, "Detecting a Target With Quantum Entanglement", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 37, no. 5, pp. 68-90, 1 May 2022.
- [5] J. S., Bell, "On the Einstein Podolsky and Rosen paradox", *Physics* Vol. 1, No. 3, pp. 195-290, Physics Publishing Co., Printed in the United States, Bell System Technical Journal, 1964.
- [6] J. D., Hidary, "Quantum Computing: An Applied Approach". Mountain View, CA: Ed. Springer, 2019.
- [7] L. Maccone e C. Ren. "Quantum Radar", *Phys. Rev. Lett.*, p. 200503, Vol. 124, issue 20, May 2020 [American Physical Society, 2020].
- [8] M. Nielsen e I. L. Chuang, "Quantum computation and quantum information", Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-63503-5, pp. 25. 2000.
- [9] M. Krelina, "Quantum technology for military applications", *EPJ Quantum Technology*. 8. 10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y. 2021.
- [10] M. Krelina e Lieutenant Colonel Denis Důbravčik, "Quantum Technology for Defence: What Expect for the Air and Space Domains", Joint Air and Space Power Conference Edition 35, 2023.
- [11] P., Edward, "Commercial and Military Applications and Timelines for Quantum Technology", RAND Corporation (https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA1482-4.html), RR-A1482-4, 2021.
- [12] R. Kaltenbaek, A. Acin, L. Bacsardi, P. Bianco, P. Bouyer *et al.* "Quantum Technologies in Space". 2021.
- [13] R. P. Feynman, "Simulating Physics with Computers". Pasadena, California, p. 22, Department of Physics, California Institute of Technology. 1981.
- [14] W. Zhang *et al.*, "Interfacing a two-photon NOON state with an atomic quantum memory", *Phys. Rev. A*, Vol. 98, issue 6, pp. 063820, Dec 2018 [American Physical Society, 2018].
- [15] Brasil, Portaria GABAER Nº 33/GC3, de 29 de janeiro de 2021. Aprova a edição da Diretriz que dispõe sobre a Implantação do Planejamento Baseado em Capacidades (PBC) no Comando da Aeronáutica. Boletim do Comando da Aeronáutica (BCA) nº 024, de 4 de fevereiro de 2021.
- [16] Mordor Intelligence, "Quantum Sensors Market Size (2018-2028)", Mordor Intelligence Research & Advisory, 2023. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/quantum-sensors-market>. Acesso em 02 de setembro de 2023.
- [17] Scientific Sales Inc, "Davis 6332 Solar-Powered Wireless Sensor Transmitter", disponível em: <https://www.scientificsales.com/Davis-Instruments-6332-Sensor-Transmitter-p/6332.htm>. Acesso em 02 de setembro de 2023.
- [18] Scientific Sales Inc, "7210 Davis AirLink Professional Air Quality Sensor", disponível em: <https://www.scientificsales.com/7210-Davis-AirLink-Professional-Air-Quality-Sensor-p/7210.htm>. Acesso em 02 de setembro de 2023.
- [19] Scientific Sales Inc, "6450 Davis Solar Radiation Sensor", disponível em: <https://www.scientificsales.com/6450-Solar-Radiation-Sensor-p/6450.htm>. Acesso em 02 de setembro de 2023.
- [20] Scientific Sales Inc, "SQ-515 Amplified 0-5 V Full-Spectrum Quantum Sensor", disponível em: <https://www.scientificsales.com/SQ-515-Amplified-0-5V-Full-Spectrum-Quantum-Sensor-p/sq-515.htm>. Acesso em 02 de setembro de 2023.
- [21] MKS Shop, "Apogee SQ-520 Quantum Sensor", disponível em: https://mksshop.de/epages/34ad456e-eaf1-4da6-b075-1420e40d098f.s/f/?Locale=de_DE&ObjectPath=/Shops/34ad456e-eaf1-4da6-b075-1420e40d098f/Products/996&ViewAction=ViewProductViaPortal&gclid=Cj0KCCQjwusunBhCYARIsAFBsUP9WKKelC8ae3L0eCfsYnL58yvSu_OqTk9Medn9CzLU7zNMzknPBwiAaAjk3EALw_wcB. Acesso em 02 de setembro de 2023.
- [22] MKS Shop, "Apogee Quantum Meter MQ-210", disponível em: https://mksshop.de/epages/34ad456e-eaf1-4da6-b075-1420e40d098f.s/f/?Locale=de_DE&ObjectPath=/Shops/34ad456e-eaf1-4da6-b075-1420e40d098f/Products/861&ViewAction=ViewProductViaPortal&gclid=Cj0KCCQjwusunBhCYARIsAFBsUP8K-6BAVJ3DMNvG3hVDUc3nQ3-qhVGFZCogeWiAvIM39HmbMS2QtCQaAoOSEALw_wcB. Acesso em 02 de setembro de 2023.
- [23] F., Marcin, "Sensores Quânticos para Defesa e Segurança Nacional", 2023, disponível em: <https://ts2.space/pt/sensores-quanticos-para-defesa-e-seguranca-nacional/>. Acesso em 03 de setembro de 2023.