

Análise sobre a importância dos dispositivos de energia dirigida a laser e potencial uso dual: perspectivas para uma solução brasileira

Analysis of the importance of laser-based directed energy devices and their potential dual use: perspectives for a Brazilian solution

Resumo: O desenvolvimento e uso de tecnologias passíveis de uso dual, entendidas como aquelas aptas ao emprego tanto em aplicações de uso civil quanto em missões tipicamente militares (com ou sem pequenas adaptações), é um fenômeno histórico. Entre as tecnologias avançadas com possibilidades de uso dual se destacam aquelas baseadas em princípios de energia dirigida (Armas de Energia Dirigida, AED), que já são objeto há algum tempo de pesquisas de potências militares (Estados Unidos, Rússia, China e Índia), apesar de tais projetos se encontrarem aparentemente em fase ainda essencialmente teórica ou experimental. A partir da disseminação da tecnologia de Veículos Aéreos Não Tripulados (Vant), ou “drones”, como arma de guerra efetiva e operacional, sobretudo a partir da eclosão de conflitos de grande intensidade no início dos anos 2020, o desenvolvimento de sistemas a laser como vetores antiaéreos especificamente voltados para essa ameaça ganhou ímpeto, sendo até mesmo anunciados por vários países como disponíveis em seus arsenais, embora a opinião majoritária dos cientistas na área de fotônica seja cética quanto à efetiva superação dos obstáculos técnicos envolvidos. Nesse contexto, vislumbra-se potencial para que a tecnologia de AED baseadas em laser de fibra possa ser desenvolvida no Brasil a partir de esforços de inovação com características de uso dual.

Palavras-chave: Tecnologia; Uso dual; Laser; Drone; Desenvolvimento; Brasil.

Abstract: Development and use of dual-use technologies, understood as those capable of being used in both civilian applications and typically military missions (with or without minor adaptations), is a historical phenomenon. Among the advanced technologies with dual-use possibilities are those based on directed energy principles (Directed Energy Weapons – DEW), which have been the subject of research for some time by military powers (the United States, Russia, China and India), although these projects are apparently still at an essentially theoretical or experimental stage. Since the spread of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology, or “drones,” as an effective and operational weapon of war, especially since the outbreak of high-intensity conflicts in the early 2020s, the development of laser systems as anti-aircraft vectors specifically aimed at this threat has gained momentum, and has even been announced by several countries as being available in their arsenals, although the majority of scientists in the field of photonics are skeptical as to whether the technical obstacles involved will actually be overcome. In this context, there is potential for DEW technology based on fiber lasers to be developed in Brazil through innovation efforts with dual-use characteristics.

Keywords: Technology; Dual-use; Laser; Drone; Development; Brazil.

Luiz Fabrício Thaumaturgo Vergueiro 

Escola Superior da Advocacia-Geral da União (ESAGU).
São Paulo, SP, Brasil.
luizfabriciovergueiro@gmail.com

Recebido: 20 abr. 2025

Aprovado: 09 abr. 2026

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

ISSN on-line 2316-4891 / ISSN print 2316-4833

<http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/index>



Creative Commons
Attribution Licence

1 INTRODUÇÃO

Segundo tradicional conceituação, tecnologias de uso dual são aquelas alimentadas por uma tecnologia de núcleo comum, definidas pelo uso final, e não pelos recursos para o seu desenvolvimento, podendo encontrar usuários civis, militares ou ambos (Gummet; Reppy, 1988). Entretanto, essas tecnologias não se limitam aos “artefatos”, mas também abrangem o conhecimento técnico, incluindo a base científica, a experiência e as habilidades (capital humano, *know-how* e *know why*) da força de trabalho. Além disso, o domínio dos processos de fabricação e de gerenciamento se somam à comunidade tecnológica necessária para produzir esses artefatos. Um exemplo disso é o conhecimento sobre integração de sistemas (Watkins, 1990).

Entre as tecnologias de uso dual, segundo a conceituação adotada, a partir da primeira década do século XXI, passaram a despontar aquelas relacionadas ao controle de fontes energéticas para aplicação em sistemas de orientação e navegação, assim como em armas propriamente ditas (Avila *et al.*, 2009), genericamente designadas armas de energia dirigida (*Directed Energy Weapons* [DEW]).

Segundo Deveci (Deveci, 2007), no início da segunda década do século XXI, são catalogadas e consideradas viáveis Armas de Energia Dirigida (AED) que envolvem a segmentação ótica de feixes energéticos (laser), a ionização de partículas (plasma), ou a modulação de ondas eletromagnéticas (micro-ondas).

A palavra “laser” é o acrônimo da expressão em língua inglesa *light amplification by stimulated emission of radiation*, normalmente traduzida como “amplificação da luz por emissão estimulada de radiação”. Na prática, tendemos a nos referir ao laser quando se tem em mente dispositivos que produzem Radiação Eletromagnética (REM), cuja unidade elementar é o fóton, com características próprias. O fóton, de acordo com a física quântica, é simultaneamente onda e partícula. O espectro eletromagnético é constituído por radiação de vários comprimentos de onda, mas denominamos luz aquela faixa de radiação que é percebida pelo olho humano. Diferentemente da luz solar, que é caótica e emite radiação em todas as direções e de todo o espectro de comprimento de onda, a luz laser é coerente (as ondas estão em fase no tempo e no espaço), monocromática (tem o mesmo comprimento de onda, colimada (as ondas têm a mesma direção, a luz é paralela, não divergente, estreita, concentrada, um milímetro de diâmetro) e de alta intensidade. O laser já é usado na pesquisa científica, na indústria (para cortar materiais de grande dureza, como o aço) e na medicina (Catorze, 2009).

Na esfera militar, o laser também já é utilizado de forma corriqueira nas mais diversas formas de sensores, mas sua aplicação como AED resulta do conceito de projeção de uma grande quantidade de energia armazenada pela própria arma, sobre um alvo determinado (por exemplo: um míssil balístico, uma aeronave, um satélite etc.), produzindo neste dano estrutural ou incendiário (Correa *et al.*, 2018).

O Brasil igualmente utiliza e produz equipamentos para uso industrial, de saúde, agrícola e de saneamento, entre outros (Bagnato, 2008), que aproveitam de alguma forma os mesmos princípios de energia dirigida inerentes às AED, sendo possível, ao menos em um nível hipotético, o aproveitamento dos primeiros, juntamente com o conhecimento associado, para o desenvolvimento ou adaptação das últimas.

Desde o ponto de vista militar, o advento das armas de energia direta (lasers e micro-ondas de alta potência) tende a gerar reflexos de alcance estratégico no atual sistema internacional, uma vez que,

mais do que uma inovação pontual, o surgimento desse novo tipo de arma ocorreria no contexto de três macrotransformações que caracterizam nossa época: a transição da matriz energética (superação dos combustíveis fósseis), a transição demográfica (na escala de bilhões) e uma transição tecnológica (digitalização e indústria do conhecimento). Da mesma forma que essas transições produzirão reflexos significativos, conquanto ainda incertos do ponto de vista ecológico, econômico, político etc., novas armas estratégicas potencialmente modificariam a distribuição de poder no sistema internacional, mesmo que os vetores dessa transformação ainda sejam controversos (Avila *et al.*, 2009).

A teoria da dissuasão (*deterrence*) adquiriu conteúdo científico mais preciso e centralidade doutrinária no ambiente da aparição das armas nucleares durante a Guerra Fria. Trata-se de um olhar teórico sobre a lógica do relacionamento estratégico entre atores com capacidade de retaliação, desenvolvida por estrategistas civis, sobretudo nos Estados Unidos (Bernard Brodie, Henry Kissinger, Thomas Schelling, Herman Kahn, Albert Wohlstetter etc.), mas também na Europa (Raymond Aron, Lawrence Freedman, Colin Gray etc.), que contempla a ideia de dissuasão baseada na ameaça crível de uma punição extremamente severa a ponto de impedir a ação de um adversário, e logo adquiriu um significado próprio, associado ao potencial destrutivo das armas nucleares (Avila *et al.*, 2009).

Nesse desiderato, assim como ocorreu com os tanques e aviões, as armas a laser não vão abolir as armas nucleares e seus vetores, ou mesmo muitos dos sistemas de armas convencionais atualmente predominantes, porém, tendem a ser armas de dissuasão e emprego operacional mais crível do que as armas nucleares, pois permitem um controle maior dos custos humanos da guerra. Como também têm custo econômico e barreiras tecnológicas de acesso menores do que os arsenais termonucleares, as armas de energia direta a laser podem horizontalizar e equalizar a competição militar, resultando em uma distribuição multipolar mais balanceada no sistema internacional (Avila *et al.*, 2009).

As armas a laser manipulam diferentes formas de energia eletromagnética, a depender dos objetivos visados: diodo laser de baixa potência, laser químico de alta potência, ondas milimétricas ou micro-ondas. Suas primeiras aplicações operacionais realísticas seriam a defesa contra mísseis balísticos, incluindo dispositivos na órbita espacial da Terra, e, com esse escopo, têm sido desenvolvidas progressivamente desde a década de 1960, em paralelo a uma série de descobertas científicas e de conquistas tecnológicas (Correa *et al.*, 2018).

O resultado produzido por armas cinéticas é o dano ou o fogo, que podem ser fatais para o alvo. As armas cinéticas se baseiam em propelentes com energia química ou ogivas explosivas, que são projetadas sobre algum alvo. Já as armas de energia dirigida compartilham o conceito de projeção, sobre um alvo, de uma grande quantidade de energia armazenada pela própria arma, produzindo dano estrutural ou incendiário. Diferem das armas cinéticas, nesse particular, pela produção de efeitos na velocidade da luz, em lugar de velocidades supersônicas ou subsônicas, como as armas de projéteis (LaPorta; Feller, 2017).

A maior parte da literatura contemporânea agrega em conjunto uma gama de armas de energia dirigida diferentes, incluindo o laser de alta potência (*high energy laser*), micro-ondas de alta potência (*high power microwave*), armas de feixe de partículas e de plasma induzido por laser (*laser induced plasma channel*). As duas primeiras classes podem ser descritas como armas de energia dirigida genuínas, enquanto as armas de partículas seriam mais bem classificadas como armas de projéteis, que utilizam partículas atômicas ou subatômicas, aceleradas a velocidades relativísticas (Correa *et al.*, 2018).

Especula-se que na próxima década haverá uma ampla introdução de armas a laser de alta potência, com capacidade operacional, no arsenal dos Estados Unidos. Tais armas possuirão capacidades ímpares para atacar alvos na velocidade da luz, reduzindo consideravelmente a eficiência de muitos dispositivos cinéticos, especialmente mísseis balísticos (LaPorta; Feller, 2017).

Entretanto, o entusiasmo acerca da iminência do uso corriqueiro e em larga escala das armas de energia dirigida não é compartilhado por todos os estudiosos, que enfatizam a existência de barreiras significativas para o sucesso das armas a laser no curto prazo, notadamente a dificuldade de transpor soluções tecnológicas laboratoriais para validação no ambiente operacional, com base em conceitos operacionais, lógicos e materiais compatíveis com a segurança que se espera de um sistema de armas. É de se considerar também a definição de uma possível política de emprego dessas armas segundo os conceitos ainda vigentes no direito e nos costumes internacionais (Gutheinz, 2006).

2 METODOLOGIA DE PESQUISA

Esta pesquisa adotou a metodologia de *technology roadmapping* (mapeamento tecnológico), uma técnica flexível e amplamente utilizada na indústria para dar suporte ao planejamento estratégico e de longo prazo (Phaal; Farrukh; Probert, 2004). Essa abordagem fornece um meio estruturado e frequentemente gráfico para explorar e comunicar as relações entre mercados, produtos e tecnologias em evolução ao longo do tempo. O *roadmapping* tecnológico permite identificar, avaliar e selecionar alternativas tecnológicas estratégicas que suportam o cumprimento dos objetivos organizacionais (Camargo *et al.*, 2017).

A coleta de dados foi realizada mediante pesquisa bibliográfica sistemática em bases de dados acadêmicas reconhecidas, incluindo Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e Google Scholar, abrangendo publicações do período de 2000 a 2023. As palavras-chave utilizadas incluíram: “*directed energy weapons*”, “*high power laser*”, “*fiber laser*”, “*dual-use technology*” e “*UAV defense systems*”. Complementarmente, realizou-se análise documental de relatórios técnicos governamentais, *white papers* de agências de defesa e artigos de mídia especializada sobre o desenvolvimento de armas de energia dirigida nas principais potências militares (Estados Unidos, Rússia, China e Índia). A seleção de fontes priorizou artigos *peer-reviewed*, relatórios oficiais e fontes primárias, com ênfase em publicações dos últimos dez anos para dados técnicos, embora fontes históricas tenham sido incluídas para contextualização.

Para mapear a evolução tecnológica e identificar oportunidades de desenvolvimento nacional, aplicou-se especificamente a arquitetura de *roadmapping* genérica proposta por Phaál, Farrukh e Probert (2004), que integra perspectivas comerciais e tecnológicas ao longo de um eixo temporal. Esse método permite identificar *gaps* tecnológicos, antecipar necessidades futuras e alinhar recursos com objetivos estratégicos. O processo de *roadmapping* envolveu três fases principais: 1) atividades preliminares, incluindo definição de escopo e horizonte temporal; 2) desenvolvimento do mapa tecnológico, com identificação de requisitos críticos do sistema, especificação das principais áreas tecnológicas e identificação de alternativas tecnológicas; e 3) atividades de acompanhamento, incluindo revisão e atualização periódica do mapa.

O estudo reconhece limitações metodológicas inerentes à natureza sigilosa das informações técnicas militares, o que restringiu o acesso a dados operacionais precisos e dificultou

a validação independente de anúncios governamentais sobre sistemas operacionais. Adicionalmente, a análise da capacidade técnica brasileira tem caráter exploratório, baseando-se em informações públicas e consultas limitadas a especialistas, sem levantamento exaustivo da infraestrutura nacional disponível. Não obstante essas limitações, a metodologia de *roadmapping* tecnológico mostrou-se apropriada para a análise prospectiva de tecnologias emergentes em ambientes caracterizados por incertezas e complexidade técnica, permitindo a integração sistêmica de múltiplas fontes de informação e a identificação de trajetórias tecnológicas viáveis para o contexto brasileiro.

3 ESTADO ATUAL DO EMPREGO DE LASER EM PLATAFORMAS MILITARES

Além dos Estados Unidos, é reconhecida a existência em estágio avançado de programas similares na Federação Russa, na República Popular da China e na República da Índia (Feickert, 2018), embora os Estados Unidos tenham sido o primeiro país a desenvolver experimentos com potencial militar realista. No início dos anos 1970, já era claro para o Departamento de Defesa estadunidense que seria viável um sistema de arma a laser aerotransportado usando a tecnologia disponível, uma ideia propagada ativamente nos anos 1960 pelo físico Edward Teller, um dos criadores da bomba de hidrogênio. Em 1973, a força aérea derrubou um veículo aéreo não tripulado no estado do Novo México, usando um laser a gás dinâmico (*Gas Dynamic Laser*, GDL); em 1976, o exército destruiu alguns veículos não tripulados com laser de alta energia (*high energy laser*), no Alabama; e em 1978, a marinha abateu um míssil TOW do exército, com laser químico, na Califórnia. Existem, dessa forma, programas de armas de energia dirigida nas três forças armadas norte-americanas, para uso aeroespacial, naval e terrestre.

Para melhor compreensão das características técnicas das principais tecnologias de laser de alta potência desenvolvidas para aplicações militares, apresenta-se a seguir uma análise comparativa entre os sistemas GDL, *Chemical Oxygen Iodine Laser* (COIL) e laser de fibra (*fiber laser*), conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Comparação entre tecnologias de laser de alta potência

Característica	GDL	COIL	Laser de Fibra
Comprimento de onda	10,6 μm (CO_2)	1,315 μm	$\sim 1,0 \mu\text{m}$
Potência típica	Alta (classe MW)	Muito alta (classe MW)	Média-alta (50-300 kW)
Eficiência energética	Alta ($\sim 30\%$)	Moderada ($\sim 20\%$)	Alta (30-40%)
Status atual	Obsoleta (anos 1970-1980)	Descontinuada (2014)	Em desenvolvimento ativo
Fonte de energia	Combustível queimado	Reação química	Elétrica (lasers diodo)
Vantagens principais	Alta potência, boa eficiência	Altíssima potência, independência elétrica	Compacto, eficiente, modular, boa qualidade de feixe
Desvantagens	Óptica grande, alta absorção atmosférica	Logística complexa, produtos tóxicos, alto custo	Potência limitada, desafios de propagação
Aplicações notáveis	<i>Airborne Laser Laboratory</i> (ALL) – anos 1980	<i>Airborne Laser</i> (ABL) – Boeing 747	M-SHORAD, HELIOS, <i>Iron beam</i> , sistemas anti-drone

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Olson (2012) e Al-Aish (2015).

Conforme observado no Quadro 1, a evolução das tecnologias de laser para aplicações militares demonstra uma clara trajetória de desenvolvimento. O GDL, pioneiro nos anos 1970, foi progressivamente substituído pelo COIL nos anos 1990 devido à sua maior potência e ao seu menor comprimento de onda. Entretanto, ambas as tecnologias enfrentaram limitações significativas relacionadas à complexidade logística e aos custos operacionais. Atualmente, os sistemas baseados em laser de fibra representam o estado da arte, oferecendo um equilíbrio otimizado entre potência, eficiência, compactidade e viabilidade operacional, o que explica sua adoção generalizada em programas militares contemporâneos.

No domínio aeroespacial, ainda em 1976, a Força Aérea dos Estados Unidos (United States Air Force, USAF) lançou o programa do laboratório laser aerotransportado, o ALL, instalando um dispositivo GDL sobre um avião de transporte modificado, capaz de rastrear e destruir alvos aéreos. Apesar de experimental, já tinha como objetivo a destruição de mísseis balísticos, sob o lema da “paz através da luz”. A mesma tecnologia foi o esteio teórico do programa de defesa antimísseis “guerra nas estrelas”, da administração Reagan (1981-1989), a ser empregado com apoio de complexo sistema de espelhos adaptativos e sensores preposicionados na órbita terrestre (Olson, 2012).

Utilizando as lições aprendidas durante o programa ALL, a USAF lançou em 1996 outra iniciativa similar, denominada simplesmente laser aerotransportado, o ABL, dessa vez instalando emissores de laser químicos infravermelhos de alta energia (*Chemical Oxygen Iodine Laser* – COIL HEL) em aeronaves Boeing 747 (Olson, 2012).

A concepção de defesa antimíssil prevaleceu, projetando-se o ABL para ser empregado em tempos de crise patrulhando o espaço aéreo vizinho ao de um país que ameaçasse disparar mísseis balísticos com ogivas nucleares e outras armas de destruição em massa, de tal forma que, se disparados, seriam abatidos ainda na fase inicial (tropopausa), assegurando-se que os destroços e ogivas caíssem no território do próprio país lançador. Mas logo se cogitou uma segunda aplicação, como arma antissatélite eficaz para destruir ou inutilizar satélites ou veículos espaciais de reconhecimento em órbita baixa. Com base na tecnologia ABL, em 2006 foi lançada a iniciativa do laser tático avançado (*Advanced Tactical Laser*, ATL), integrada por sistemas COIL HEL menores e mais baratos instalados em plataformas de transporte Hercules AC-130 Spectre, para ataque ao solo em missões de apoio cerrado. O sistema teria sido utilizado experimentalmente com sucesso contra alvos em terra, em testes no Novo México (Olson, 2012).

Já na Rússia, ainda durante o período soviético, teve início o programa Almaz/Beriev A-60, com o primeiro protótipo de uma aeronave de transporte Ilyushin Il-76 Candid equipada com emissores de laser de alta potência em 1981, e um segundo em 1991. Não é plenamente conhecida a tecnologia dos emissores russos, porém, considerando-se as pesquisas da empresa Almaz com a tecnologia GDL (a mesma experimentada pelo programa ALL dos Estados Unidos), em sistemas de combate terrestre, analistas estimam que estes sejam a base da plataforma russa, o que seria consistente com a linha de teórica Terra-3, concebida desde o início para desenvolver defesas antimíssil balístico (Zarubin; Pol'Skikh, [20-?]). Analistas também chamam a atenção para o fato de que, tendo sido expostos pelo menos vinte anos antes na Rússia, os emissores do sistema norte-americano ABL apresentados em 2006 parecem ter adotado a mesma configuração.

Em 2016, o estabelecimento de pesquisa e desenvolvimento da empresa Almaz teria anunciado a conclusão de uma versão modernizada do programa A-60. O Ministério da Defesa da Federação Russa publicou nota oficial do vice-ministro da Defesa, Yuri Borisov, segundo a qual o país tinha armas a laser baseadas em uma tecnologia já bem conhecida e confiável, não mais no

estágio experimental, prontas para início operacional em plataformas aéreas entre 2020 e 2022 (Russia [...], 2017), fato aparentemente reafirmado pelo relatório de 2018, do diretor de Inteligência Nacional dos Estados Unidos, para o congresso norte-americano (Coats, 2018).

A República Popular da China possuiria programas de armas de energia dirigida baseados principalmente nas tecnologias de laser químico infravermelho (COIL) e de laser de elétrons livres (*Free Electron Lasers* [FEL]), além de uma outra série de iniciativas com o uso de laser em diferentes modalidades (principalmente terrestres e de baixa intensidade), que não importam neste estudo. Os primeiros experimentos ainda na década de 1960 foram conduzidos com laser em estado sólido (*Solid State Lasers* [SSL]), de baixa potência.

O desenvolvimento da tecnologia FEL estaria a cargo da Academia Chinesa de Engenharia e Física, e resultou na ativação do dispositivo SG-1, em 1993. Por outro lado, a tecnologia COIL teria sido designada ao Instituto Dalian de Química e Física, desde a década de 1980, conduzindo ao primeiro teste de um dispositivo com alcance de 140 quilômetros e 1993.

A China parece concentrar esforços em plataformas de ataque em grandes bases terrestres, com emissores apontados para alvos em órbita terrestre baixa, isto é, com objetivo primordial antissatélite. Um artigo científico de 2013 revelou a realização de um experimento exitoso em 2005, danificando um satélite em órbita a aproximadamente seiscentos quilômetros, por meio de um laser com entre cinquenta e cem kilowatts de potência posicionado na província de Xinjiang (Gao; Zhou; Wang, 2013). Isso se coaduna com a estratégia chinesa de basear outros sistemas de longo alcance em terra, a exemplo de mísseis hipersônicos antinavio.

Essa estratégia, por outro lado, poderia ser indício da dificuldade chinesa de miniaturizar as estruturas de acondicionamento de elementos químicos e de geração de grande quantidade energia, necessárias ao emprego de sistemas de energia dirigida, isto é, poderiam se encontrar um passo aquém dos programas ALL/ABL estadunidense e A-60 russo. Apesar disso, há relatos de que em evento militar de outubro de 2009 teria sido revelado um teste com sucesso de aeronave quadrimotor utilizando dispositivo a laser para atacar um satélite, com base em plataforma previamente anunciada de aparelho produzido pela Xian Aircraft Corporation. Especula-se que a China possa ter um programa de laser aerotransportado com tecnologia COIL, mas que, diferentemente dos sistemas russos e estadunidenses voltado para emprego antimíssil, a plataforma chinesa também seria projetada primordialmente para uso antissatélite (Fisher Jr., 2017).

A República da Índia ingressou no cenário de desenvolvimento de armas de energia dirigida há relativamente pouco tempo, ao que parece em resposta à ameaça chinesa ao seu próprio programa espacial, que caminhou paralelamente ao esforço indiano de desenvolvimento de mísseis balísticos e de seu programa nuclear. O programa espacial da Índia teve início na década de 1960, com apoio de Estados Unidos, França e Alemanha, principalmente na área de satélites. O programa de veículo lançador caminhou em paralelo, com o objetivo não declarado de desenvolver o sistema de míssil balístico intercontinental Agni-V.

A situação geoestratégica indiana é condicionada pela ameaça perene dos países vizinhos, especialmente a China e o Paquistão, com os quais já travou guerras ainda no século XX, além de constantes atritos nas faixas de fronteiras. Assim como a Índia, tanto a China como o Paquistão possuem arsenal nuclear e mísseis balísticos. É essencial aos indianos, portanto, a manutenção de sistemas tanto ofensivos quanto defensivos no campo aeroespacial, aptos a reagir contra eventuais agressões de nações confrontantes.

É nesse contexto que a partir de 2008 a Índia teria incrementado investimentos de natureza militar no setor espacial (Sarti, 2015). Para isso, o Organismo de Pesquisa e Desenvolvimento em Defesa (*Defense Research and Development Organisation* [DRDO]) teria iniciado a partir de 2014 o desenvolvimento de um sistema de armas de energia dirigida antimísil e antissatélite. Estariam sendo exploradas a tecnologia COIL e de laser de fibra de alta potência (*highpower fiber laser*), de uso estratégico (Bose, 2014).

Em dezembro de 2017, o DRDO anunciou o teste com sucesso de uma plataforma a laser de um kilowatt instalado sobre um caminhão, em Chitadruga, na presença do ministro da Defesa, Arun Jaitley. Não é claro qual foi o princípio utilizado pelo dispositivo desse teste, mas há notícias de que o Centro de Ciência e Tecnologia Laser (Laser Science & Technology Centre, LASTEC) vinha trabalhando em projeto com as mesmas características, baseado na tecnologia COIL. O LASTEC também estaria projetando um sistema baseado na tecnologia de laser a gás dinâmico (GDL), mesmo princípio utilizado pelo ALL dos Estados Unidos e pelo A-60 russo, denominado “Aditya” (Gurung, 2017).

Ainda não existe previsão para a instalação de sistema equivalente para teste a bordo de aeronave, porém, já haveria estudos para uma versão aerotransportada do sistema de micro-ondas (outra classe de armas de energia dirigida) *Kilo Ampere Linear Injector* (KALI), em uma aeronave Ilyushin Il-76, a mesma utilizada pelo projeto A-60 russo. Considerando o tamanho, o tipo de sensores para aquisição de alvos e as características de um dispositivo de energia dirigida por micro-ondas, é realista imaginar que também um sistema a laser possa ser empregado na mesma plataforma.

No Brasil, o desenvolvimento de pesquisas em laser e a formação dos correspondentes recursos humanos se desenvolvem primordialmente no Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), e no Instituto de Estudos Avançados (IEA), ambas dependências Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), integrante da estrutura do Comando da Aeronáutica, há aproximadamente trinta anos, com avanços na área de laser de alta intensidade (*high power laser* [HPL]). Embora todos esses projetos de pesquisa ostentem natureza dual (civil-militar), a Força Aérea Brasileira (FAB) tem dedicado especial atenção ao desenvolvimento de armas a laser desde 2000. Nesses estudos, a tecnologia que teria sido considerada mais adequada para projetos de armas de energia dirigida a laser seria a COIL, tendo em vista vantagens táticas relativas às necessidades de energia e de transporte de “cartuchos” químicos de dimensões adequadas aos possíveis vetores disponíveis (Roso; Moreira; Oliveira, 2014).

Estudos relevantes sobre tecnologias de laser, inclusive de alta potência, também vêm sendo desenvolvidos pelo Centro de Lasers e Aplicações, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (CLA-Ipen), instituto de pesquisa civil vinculado à Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação do Governo do Estado de São Paulo, visando primordialmente à sua aplicação nas áreas da saúde, de processamento de materiais, em monitoramento ambiental e na área nuclear (Marciotto, 2017).

A análise dos vários programas de laser permite antever que, embora haja grande expectativas quanto ao emprego de armas de energia dirigida atuando sobre esse princípio, tanto no domínio aeroespacial quanto no espacial, cujos limites parecem desaparecer diante do alcance possível dessas emissões (Ellis, 2015), a realidade dos sistemas operacionais (ou próximos de operacionalidade) indica dois usos correntes: a defesa antimísseis balísticos e o emprego antissatélite.

As iniciativas chinesas e indianas, majoritariamente concentradas em grandes complexos em terra, são ostensivamente dirigidos a essas finalidades, e não há perspectiva realista de que sistemas aerotransportados estejam disponíveis para ambos os países a curto ou médio prazo.

Os programas russos, mais adiantados e, segundo os indícios disponíveis, em estado de pronto operacional (ou de sua iminência), contemplam a possibilidade concreta de sistemas de armas de energia dirigida a laser baseadas na tecnologia GDL em vetores aerotransportados. A doutrina de emprego russa, ainda assim, aponta igualmente em direção ao uso antimíssil e antisatélite.

Já os vários programas estadunidenses autorizam a vislumbrar o emprego de armas a laser mais no domínio aeroespacial, seja em plataformas aerotransportadas, seja em sistemas combinados de emissores em terra com dispositivos em órbita. Mesmo assim, não há indicativos seguros de que o emprego tático da iniciativa ATL esteja operacional ou próximo disso.

Projetos muito mais ambiciosos de estabelecimento de plataformas orbitais dotadas de seus próprios emissores de energia dirigida a laser, para uso antissatélite, antimíssil e até mesmo tático contra alvos na superfície terrestre, vêm sendo teorizados e estimados para a década de 2040 (Friedman, 2009). Um passo decisivo tomado pelos Estados Unidos nesse sentido foi a criação, em 2019, de uma Força Espacial independente, desdobrada da Força Aérea, com pessoal e equipamentos próprios (Sanders, 2022).

3.1 Sistemas a laser para uso contra veículos aéreos não tripulados

Outrossim, a introdução de uma outra tecnologia, relativamente nova e muito mais barata nos anos 2010, a qual vem demonstrando inimaginado efeito disruptivo nos campos de batalha recentes, encontra nos dispositivos a laser uma resposta, ao que tudo indica, mais eficaz do que outras alternativas em uso ou imaginadas.

Trata-se da introdução dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), chamados de forma mais correntes na versão em inglês de *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), ou, mais popularmente, drones. Em outubro de 2002, um míssil Hellfire lançado de um VANT Predator atingiu o veículo que transportava um dos responsáveis pelos ataques contra o navio americano *USS Cole* dois anos antes, iniciando uma nova estratégia antiterrorista baseada em ataques com drones. Um total de 563 ataques foram executados nos dois mandatos do presidente Obama, nos Estados Unidos, o que corresponde a dez vezes o número de ataques realizados por seu predecessor, George W. Bush. A partir de então, vários países despertaram para as possibilidades de adicionar esse tipo de equipamento em seus arsenais (Nascimento, 2019).

Um VANT pode ser definido como *“uma máquina voadora que não contém um ser humano. Ela é distinta de uma arma guiada, como uma bomba guiada a laser ou míssil de cruzeiro porque, não é uma ogiva de uso único veículo. Um VANT pode ser pilotado remotamente ou pode ser autônomo”* (Killeen; Jordan, 2013, p. 13, tradução nossa). O principal benefício dos VANT é que eles não necessitam de um homem a bordo. Não apenas o aspecto político das baixas humanas, mas também a ausência de fadiga e fome, sua capacidade de esconder da opinião pública o uso da força, juntamente com o fato de serem relativamente baratos, fazem deles um elemento tão atrativo (Nascimento, 2019).

Nas duas conflagrações em sentido tradicional, no início dos anos 2020, mostrou-se intenso o uso dos drones, infligindo danos além do esperado, e mesmo contra adversários mais poderosos e, supostamente, mais avançados, como se vê, no último caso, durante o conflito russo-ucraniano.

A partir de 27 de setembro de 2020, as Forças Armadas armênicas iniciaram uma ofensiva da linha de frente na disputada região do Nagorno-Karabakh, provocando uma contraofensiva das forças do Azerbaijão, dando lugar ao que ficou denominado como a “guerra dos 44 dias”. No total, durante os 44 dias de guerra, cerca de 1.500 posições de defesa aérea armênicas, sistemas de artilharia, blindados e outros veículos foram destruídos, principalmente a partir do uso de VANT de fabricação turca pelas forças azeris, resultando na vitória destas e na reconquista de uma região que era reivindicada havia anos (Iskandarov; Gawliczek, 2021).

Já no conflito russo-ucraniano, iniciado em 24 de fevereiro de 2022, embora sejam ainda raros artigos científicos apresentando uma visão mais objetiva sobre ele, foram publicizados danos de monta a posições e meios de combate russos causados por VANT ucranianos nas fase iniciais do conflito, principalmente de fabricação turca, apesar de estarem disponíveis para as forças russas sistemas de micro-ondas de alta potência que, supostamente, seriam capazes de neutralizar esses equipamentos (Burdon, 2017). Porém, mais recentemente, apercebendo-se da letalidade e da flexibilidade dessas plataformas, também as forças russas passaram a empregar de forma significativa drones contra as forças e a infraestrutura ucraniana, recorrendo, ao que se tem notícia, a sistemas não tripulados de fabricação iraniana (Meaker, 2022).

Em ambos os casos foi registrada uma geral ineficiência dos sistemas de detecção e da artilharia antiaérea tradicional, em virtude da baixa altitude e das dimensões relativamente pequenas dos VANT, os quais, além disso, podem ser lançados de forma improvisada a partir de pequenas plataformas que se movimentam rapidamente.

A ameaça se torna ainda maior quando utilizado o conceito tático de “enxame de zangões” (*drone swarms*). São característicos dos VANT seu pequeno tamanho e a alta manobrabilidade, seus custos de produção baratos, a possibilidade de um único operador controlar simultaneamente vários drones e de os drones serem semiautônomos ou mesmo totalmente autônomos. Quando consideradas em conjunto, essas características tornam plausível o surgimento de estratégias ofensivas baseadas em ataques maciços de múltiplas unidades ou, em outras palavras, ataques de “enxame de zangões” (Guitton, 2021).

Vários países, premidos pela emergência desses vetores de combate que causaram inovações disruptivas no campo de batalha, e pela aparente ineficácia de sistemas de micro-ondas de alta potência que, em tese, seriam capazes de detê-los, passaram também a acelerar programas de laser de alta potência para uso tático e antiaéreo, a partir de plataformas menores, e com alcance mais restrito.

Dados mais confiáveis sobre a efetiva funcionalidade dos sistemas são restritos e cercados de sigilo. Além disso, a difusão de notícias inexatas sobre capacidades militares também é usada como forma de exercer influência, configurando estratégias de guerra psicológica.

Ainda assim, há notícias de repositórios relativamente confiáveis com notícias verossímeis de sistemas antiaéreos a laser.

Em meados de 2022, o ministério da Defesa do Estado de Israel divulgou notícia da operação de um protótipo completamente funcional, depois de vinte anos de pesquisas, denominado genericamente de “Iron Beam” (“feixe de ferro”, em uma tradução livre), um evidente paralelo com o sistema de mísseis de defesa aérea denominado de “Iron Dome” (“cúpula de ferro”), existente na proteção contra foguetes lançados de territórios palestinos.

O aparato consistiria de um laser com output de cem kilowatts, capaz de atingir um VANT a uma distância máxima de vinte quilômetros. Há indícios de que seria um laser químico (Saluja, 2022).

Figura 1 – Teste do sistema Iron Beam



Fonte: Rafael Defense Systems/Ministério da Defesa de Israel.

A China também anunciou, inclusive como produto disponível para venda, um sistema tático laser antidrones denominado “Silent Hunter”, produzido pela empresa Poly Technologies, disponível em versões fixas e móveis. Consiste em um laser de fibra ótica alimentado por energia elétrica com potência máxima entre trinta e cem kilowatts, e um alcance máximo de quatro quilômetros. Afirma-se que ele seria capaz de penetrar cinco placas de aço de dois milímetros a uma distância de oitocentos metros, ou uma única placa de aço de cinco milímetros a oitocentos metros, atribuindo também uma capacidade secundária contra alvos terrestres (Malyasov, 2019). A tecnologia empregada seria a do laser de fibra, já como um desdobramento de outro sistema, denominado LW-30 (China Military Drone Alliance, 2022).

Figura 2 – Silent Hunter *mobile laser system* na exposição de armas IDEX 2019, em Abu Dhabi



Fonte: tokyo-dar/Defence Blog.

Entre outros sistemas desse tipo, com menos dados disponíveis, a empresa Raytheon, dos Estados Unidos, anunciou o oferecimento de um equipamento móvel transportado a partir de um veículo utilitário denominado *High-Energy Laser Weapon System* (HELWS). Ele teria um alcance de três quilômetros e seria já um desdobramento de um veículo maior, transportado por veículo blindado Stryker, denominado *Directed Energy Maneuver-Short Range Air Defense* (DE M-SHORAD), com maior potência (cinquenta kilowatts), este último com alcance e desempenho não informados. Ambos indicam usar um laser de alta potência modular, compatível com as tecnologias de laser químico ou de fibra.

Figura 3 – HELWS montado em um veículo Polaris MRZR (*dune buggy*)



Fonte: Raytheon.

Figura 4 – DE M-SHORAD montado em um blindado Stryker



Fonte: Raytheon.

A apresentação de alguns programas de sistemas de armas a laser já em “fase operacional” parece demonstrar que, para essa classe de equipamento, de curto ou médio alcance, foram superados alguns dos desafios técnicos identificados ao longo da pesquisa, objeto de maiores comentários adiante, o que também pode indicar que sejam objetivos viáveis para desenvolvimento nacional, com capacidades instaladas já existentes no Brasil.

Conforme já mencionado em outras partes deste trabalho, por sua própria natureza estratégica, há limitações significativas no acesso direto a programas e tecnologias já desenvolvidas ou em desenvolvimento no Brasil, seja no ambiente militar propriamente dito, seja na academia, visto que, para além do aspecto da segurança, há repercussões relevantes no campo da propriedade intelectual (propriedade industrial e direito autoral), que desestimulam a apresentação de maiores detalhes.

Ciente dessas limitações desde o início do projeto, foi adotado um protocolo de interações institucionais e profissionais comprometido com a preservação de dados que, individualmente considerados, possam ser sigilosos – ainda que eventualmente acessados na pesquisa –, assim como a manutenção de sigilo de fonte, quando solicitado. Desse modo, parte do que foi obtido durante o trabalho de campo e por meio de entrevistas foi referenciado de forma limitada.

Seguindo-se a metodologia de pesquisa *technology roadmapping* (Camargo *et al.*, 2017), adotada no plano de trabalho, foram identificados vários programas acadêmicos atualmente direcionados à pesquisa com *laser* de alta potência – que interessam ao nosso estudo –, destacando-se: 1) os laboratórios de laser mantidos pela Divisão de Fotônica, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), do DCTA; e 2) o CLA) do Ipen.

Os primeiros, estando vinculados ao Comando da Aeronáutica, presumivelmente desenvolvem aplicações voltadas para a área de defesa, como indicam os trabalhos de Roso, Moreira e Oliveira (2014). Porém, tentativas de contato ao longo da fase de trabalho de campo foram negadas.

Por outro lado, contatos com o Ipen receberam respostas positivas e foram proveitosos, tanto para a compreensão geral e teórica das oportunidades e dos desafios para emprego de lasers de alta potência como armas de energia dirigida, quanto para alguns projetos em andamento, entre eles o projeto considerado mais viável para um desenvolvimento dual.

De outra parte, foram localizadas informações sobre outros projetos que estariam em andamento no Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser, no estado de Santa Catarina, com objetivos duais, juntamente com o Comando do Exército (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE SANTA CATARINA, 2016). Ocorre que, em consultas ao mencionado instituto de pesquisa, foi verificado que não há efetivamente nenhum projeto em andamento com viés de defesa, embora tenha sido credenciado para receber recursos da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), voltados para o segmento industrial em três áreas: 1) manufatura aditiva a laser; 2) tratamento de superfícies a laser; e 3) soldagem e corte a laser, esta última estaria mais vocacionada para um projeto de uso dual, por envolver o processo de desenvolvimento de laser de alta potência.

Sob o Comando do Exército foi identificado um interesse mais imediato da força terrestre em pesquisas que envolvam o desenvolvimento dos sistemas de laser de fibra, o que parece ser consistente com a potencial aplicação de sistemas a laser de alta potência para finalidade antiaérea (especialmente antidrone), similares àqueles anunciados como já disponíveis para emprego operacional e, até mesmo, comercialização.

Lasers de fibra são lasers de estado sólido, isto é, lasers que usam um componente sólido como meio ativo, em lugar de líquidos ou gases, nos quais uma fibra óptica é dopada com uma pequena porcentagem de terras raras (normalmente Érbio – Er⁶⁸). São usados diodos para estimular o material gerador, que emite fótons no comprimento de onda específico do elemento utilizado para dopagem. É uma espécie de laser que já existe há anos em baixas potências, porém apenas mais recentemente pôde atingir altas potências, superiores a quarenta kilowatts (Coelho; Lima; Costa, 2013).

Dopagem, por sua vez, é a introdução de um elemento químico para mudar as propriedades de um material. Nesse caso, o érbio serve para amplificar o sinal luminoso que se propaga nos cabos ópticos na forma de laser. Isso é fundamental, pois, quando a luz trafega por uma rede óptica, ela vai sendo absorvida e seu sinal é atenuado. De forma a recuperar a amplitude do sinal original, a solução é instalar amplificadores ópticos ao longo da rede, cujo principal componente são as fibras de érbio (Vasconcelos, 2005).

Os lasers de fibra são alimentados por eletricidade, o que os torna altamente móveis e manuteníveis no campo de batalha. Os lasers de fibra óptica utilizam fibras ópticas como meio de ganho. Para fins militares, na maioria dos casos, o meio de ganho é uma fibra dopada com terras raras, tais como érbio, neodímio (Nd⁶⁰), itérbio (Yb⁷⁰), túlio (Tm⁶⁹) ou praseodímio (Pr⁵⁹). Diodos são utilizados para bombeamento (Benzoni; Orletsky, 1989). Os lasers de fibra são robustos e não requerem uma sala limpa para operar ou manter, como a maioria dos lasers, além de serem muito eficientes. No entanto, não funcionam bem em quaisquer condições climáticas.

Um exemplo é o laser de fibra com saída de onda contínua (*continuum wave fiber laser*), que produz feixes de qualidade moderada, causando danos a materiais e aos componentes por meio de aquecimento térmico e perfuração por calor (*burn-through*). Esse tipo de laser é mais fácil de montar devido às fibras flexíveis.

Figura 5 – Sistema de laser de fibra com saída contínua



Fonte: Olson (2012).

Nesse sentido, parece ser uma tecnologia propícia ao transporte em veículos de superfície de médio porte (caminhões) ou blindados, separados (por exemplo: um caminhão transporta os geradores e ou outro o sistema de laser propriamente dito) ou montados em uma estrutura única.

4 PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE LASER PARA PROTONTERAPIA NO INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Tendo por premissa essas características do laser de fibra, foi identificado um projeto no Ipen, tendo por objeto a aceleração de partículas a laser (*laser wakefield particle acceleration*), em parceria com a Universidade de Nebraska, em Lincoln (UNL).

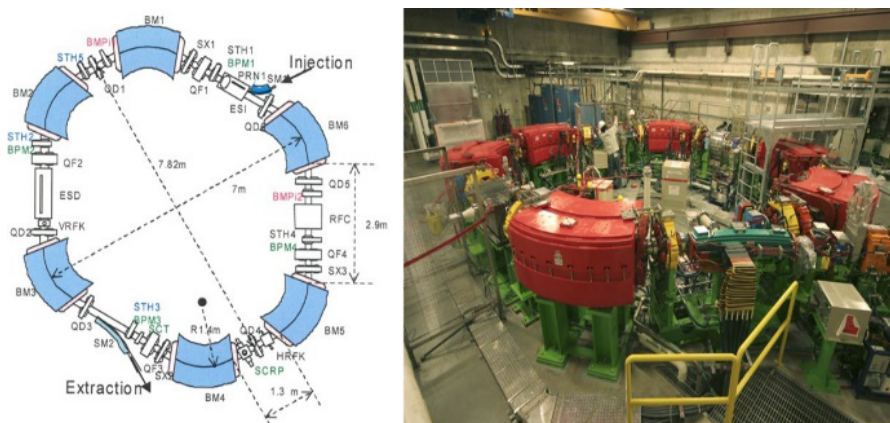
No momento que pulsos de laser de alta intensidade atingem um alvo, seus átomos são ionizados e os elétrons passam a interagir com o campo eletromagnético do laser, sendo acelerados diretamente pelo campo luminoso (força de Lorentz, ou força ponderomotiva). Separam-se os elétrons e os íons, e um plasma é formado. Para alvos sólidos e finos, o pulso passa pelo material seguido por uma nuvem de elétrons (bainha) que viaja a uma velocidade relativística. Os demais íons no alvo são atraídos pelos elétrons e repelidos entre si, produzindo um feixe de prótons e uma corrente de hadrons. Essa técnica é usada em sistemas de PW para produzir feixes de prótons de 100 MeV. Outro poderoso método de aceleração de elétrons é o *Laser Wakefield Plasma Acceleration* (LWPA), baseado na ideia de produzir um campo elétrico longitudinal no plasma para impulsionar os elétrons (Vieira, 2018).

O objetivo desse projeto é colaborar para o estabelecimento de novos regimes de aceleração de partículas para fins médicos, especialmente para a denominada protonterapia para doenças neuro-oncológicas (tumores cerebrais), em que o feixe de prótons atinge diretamente o tumor e não o ultrapassa na direção de tecidos cerebrais saudáveis.

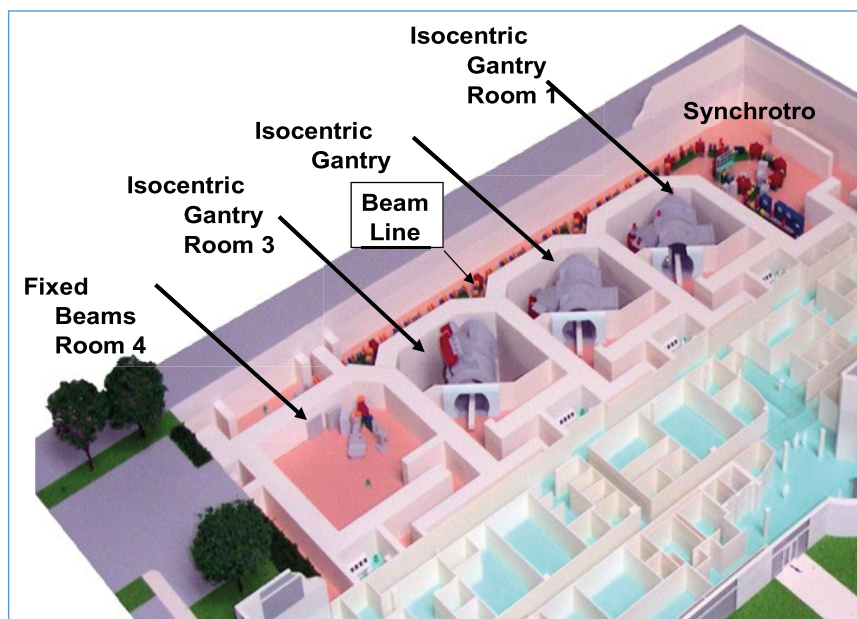
Este não é um tratamento completamente novo, porém, estima-se que existam apenas 107 unidades que utilizam a tecnologia da terapia de prótons, concentrados em poucos países, em razão do preço, já que um acelerador de partículas de prótons para essa finalidade é caríssimo, na razão de aproximadamente US\$ 40 milhões por equipamento, além do custo de operação e manutenção, feita pelas poucas empresas detentoras da tecnologia.

A tecnologia usual para um centro de protonterapia envolve a utilização de grandes instalações de ciclotrons ou síncrotons, que aceleram as partículas subatômicas (prótons), e depois as distribuem para salas onde equipamentos especializados fazem a aplicação propriamente dita. O conjunto completo exige um edifício só para si (Mohan; Grosshans, 2017).

Figura 6 – Síncrotron do Anderson Proton Therapy Center



Fonte: Mohan e Grosshans (2017).

Figura 7 – Layout do Anderson Proton Therapy Center

Fonte: Mohan e Grosshans (2017).

Por outro lado, modelos teóricos e experimentais de aceleração de partículas por meio de feixes de laser indicam que, além de uma diminuição substancial do tamanho dos equipamentos e instalações, também existe a perspectiva de um decréscimo substancial dos vários custos associados. A aceleração impulsionada pelo laser oferece uma alternativa altamente promissora, permitindo energias iônicas muito mais elevadas (Hützen *et al.*, 2019), por meio de técnicas como a do vórtice de elétrons relativístico induzido por laser em plasma de densidade quase crítica (*laser-induced relativistic electron vortex, EV, in a near-critical-density, NCD, plasma*) (Yi, 2019).

O potencial de uso dual, nesse caso, se revela altíssimo no meio civil, em que a tecnologia pode diminuir o sofrimento de um número indeterminado de pessoas afligidas por câncer, inclusive crianças, economizando ainda recursos públicos destinados ao custeio por longos períodos de radiofármacos. Além disso, a natureza médica da tecnologia tende a oferecer menor resistência para acesso a conhecimentos e materiais sensíveis, bem como viabiliza um aporte de recursos financeiros de elevada monta disponíveis para o sistema de saúde, inclusive do exterior e a fundo perdido.

Do ponto de vista militar, a tecnologia e os conhecimentos científicos associados podem ajudar a superar várias fases críticas do desenvolvimento de um sistema de energia dirigida antiaéreo, tal como aqueles descritos anteriormente.

Os mesmos desafios de produção e acumulação de energia, como o laser de fibra, servem tanto para energizar o gerador de vórtice de elétrons do acelerador de prótons quanto para energizar um emissor de laser de alta potência. As mesmas soluções necessárias para a computação nanométrica dos “alvos” neoplásicos em três dimensões no interior de cavidades do corpo humano (Samad; Vieira, 2006) podem ser adaptadas para o cálculo do disparo de pulsos de alta potência contra objetos no espaço aéreo tridimensional.

É necessário, por outro lado, destacar que, a despeito da afirmação pública feita por vários países e empresas da disponibilidade operacional de sistemas com lasers de alta potência, a comunidade acadêmica consultada ainda se mostra cética sobre a superação de alguns desafios físicos imutáveis (Stupl; Neunek, 2010).

O maior desafio parece residir na atenuação atmosférica, que afeta a propagação do feixe de laser, já que o vapor d'água naturalmente presente na mistura do ar, nas nuvens, nos aerossóis e nas partículas de poeira pode absorver ou refletir a energia do laser (Al-Aish, 2015). Outro desafio significativo repousa na necessidade de uma linha de visada direta entre o emissor e o alvo, já que os feixes não descrevem uma trajetória balística, nem são capazes de provocar efeito por explosão próxima do alvo (Roso; Moreira; Oliveira, 2014).

Além disso, quando aplicado um laser de alta potência contra um alvo que não absorve toda a energia, esta tende a ser refletida na forma de iluminação intensa, que pode gerar prejuízos graves à retina tanto de tropas aliadas quanto de inimigas, neste último caso violando o Quarto Protocolo Adicional à Convenção sobre a Proibição ou Limitação do Uso de Certas Armas Convencionais que Podem Ser Consideradas como Produzindo Efeitos Traumáticos Excessivos ou Ferindo Indiscriminadamente, sobre Armas Laser que Causam a Cegueira, de 1995, e, desse modo, potencialmente caracterizando crime de guerra (Petrocínio; Lourenção, 2020).

5 CONCLUSÕES

Ao longo da pesquisa, foi possível concluir que são viáveis teórica e tecnicamente sistemas de armas de energia dirigida com lasers de alta potência, para aplicações táticas principalmente contra VANT, a partir do desenvolvimento de tecnologias como o laser de fibra, por meio de projetos envolvendo a tríple hélice da academia, do governo e da indústria, empregando conhecimentos, profissionais e tecnologias já existentes e disponíveis no território brasileiro, com vocação dual.

Há, no entanto, desafios técnicos ainda por superar. O domínio completo do ciclo de produção de feixes de laser de alta potência no Brasil ainda não é uma realidade, e o caráter estratégico e revolucionário dessa classe de armas torna improvável o fornecimento de sistemas prontos e transferência de tecnologia de operadores que porventura tenham realmente superado obstáculos físicos à propagação do laser na atmosfera, assim como a designação de alvos em efetivo movimento em campo de batalha, e não meramente estáticos e em condições ideais de temperatura e pressão, como aqueles apresentados em ensaios tornados públicos.

Do ponto de vista da gestão financeira e de pessoal, entende-se que a vinculação de programas de uso dual com laser na área de saúde seja o mecanismo institucional mais apropriado neste momento histórico, considerando uma disponibilidade de recursos financeiros, materiais e humanos mais abundantes para o segmento de saúde do que para o segmento de defesa, que, apesar disso, pode e deve gerar conhecimentos, habilidades de integração e alguns recursos financeiros que não estariam de outra forma disponíveis somente no meio civil.

REFERÊNCIAS

- AL-AISH, T. A. K. Design and analysis the fiber laser weapon system FLWS. **Advances in Physics Theories and Applications**, v. 47, p. 59-68, 2015. ISSN 2225-0638. Disponível em: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/APTA>. Acesso em: 21 jul. 2026.
- ALMEIDA, A. L. **A evolução do poder aeroespacial brasileiro**. 2006. Dissertação (Mestrado, em Geografia Humana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ARAÚJO NETO, J. C. Fundamentos da formulação estratégica do programa de reaparelhamento naval brasileiro de 1906. **Revista Mestrado em História**, Vassouras, v. 13, n. 1., 2011.
- AVILA, F. S.; MARTINS, J. M.; CEPIK, M. Armas estratégicas e poder no sistema internacional: o advento das armas de energia direta e seu impacto potencial sobre a guerra e a distribuição multipolar de capacidades. **Contexto Internacional**, Rio de Janeiro, v. 31, n. 1, p. 49-83, 2009.
- BAGNATO, V. S. **Laser e suas aplicações em ciência e tecnologia**. São Paulo: Livraria da Física, 2008.
- BENZONI, J. F.; ORLETSKY, D. T. **Military applications of fiber optics technology**. Santa Monica: Rand Corp, 1989.
- BOSE, B. Directed energy weapons for the Indian Armed Forces. **Journal of Defense Studies**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 95-108, 2014.
- BURDON, C. J. Hardening unmanned aerial systems against high power microwave threats in support of forward operations. **Sae International**, New York, 2017. Disponível em: <https://www.mobilityengineeringtech.com/component/content/article/45802-afit-0006>. Acesso em: 17 abr. 2026.
- CAMARGO, L. S. *et al.* Technology roadmapping: uma análise bibliométrica. **Revista Mundi**, Curitiba, v. 2, n. 2, 2017.
- CATORZE, M. G. Laser: fundamentos e indicações em dermatologia. **Medicina Cutânea Ibero-Latino-Americana**, v. 37, n. 1, p. 5-27, 2009.
- CORREA, F. G.; PERON, A. E. R.; VERGUEIRO, L. F. T. Geopolítica e o domínio aeroespacial: da supremacia da aviação militar à exploração espacial por fusão nuclear. **Revista Brasileira de Estudos de Defesa**, v. 5, n. 1, p. 193-217, 2018.
- DEVECI, B. M. **Directed-energy weapons: invisible and invincible?** 2007. Dissertação (Master of Science in Electronic Warfare Systems Engineering) – Naval Postgraduate School, Monterey, 2007. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10945/3311>. Acesso em: 21 jul. 2026.

CHINA MILITARY DRONE ALLIANCE. Silent Hunter Anti-Drone Laser System. **China Defense**, [20--?]. Disponível em: <https://www.militarydrones.org.cn/silent-hunter-anti-drone-system-p00561p1.html>. Acesso em: 21 dez. 2022.

COATS, D. R. Worldwide threat assessment of the US Intelligence community. **Office of the Director of National Intelligence**, Washington, DC, 13 fev. 2018.

COELHO, B. N.; LIMA, M. S. F.; COSTA, A. R. Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na micro dureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 1338-1349, 2013.

DILÃO, R. **A ciência dos sistemas complexos**. Lisboa: IST, 1995.

ELLIS, J. D. **Directed-energy weapons: promise and prospects**. Washington, DC: Center for a New American Security, 2015. Disponível em: https://s3.us-east-1.amazonaws.com/files.cnas.org/hero/documents/CNAS_Directed_Energy_Weapons_April-2015.pdf?mtime=20160906081247&focal=none. Acesso em: 23 dez. 2022.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE SANTA CATARINA. Indústria de SC busca se qualificar para fornecer ao exército. **Fiesc**, Florianópolis, n. 443, 13 jan. 2016. Disponível em: <https://fiesc.com.br/pt-br/imprensa/industria-de-sc-busca-se-qualificar-para-fornecer-ao-exercito-0>. Acesso em: 3 jan. 2023.

FEICKERT, A. U. S. Army weapons-related directed energy (DE) programs. **Congressional Research Service**, Washington, DC, 12 fev. 2018.

FISHER JR., R. D. **China's Advanced Weapons**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: https://www.uscc.gov/sites/default/files/Fisher_Combined.pdf. Acesso em: 17 abr. 2026.

FRIEDMAN, G. **The next 100 years: a forecast for the 21st century**. New York: Doubleday, 2009.

GAO, M. H.; ZHOU, Y. Q.; WANG, Z. H. Development of space based laser weapons. **Chinese Optics**, 2013.

GUITTON, M. J. Fighting the locusts: implementing military countermeasures against drones and drone swarms. **Scandinavian Journal of Military Studies**, Copenhagen, v. 4, n. 1, 2021. Disponível em: <https://sjms.nu/articles/10.31374/sjms.53>. Acesso em: 17 abr. 2027.

GUMMETT, P.; REPPY, J. (ed.). **The relations between defence and civil technologies**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1988.

GURUNG, S. K. India gets a step closer to laser weaponry as DRDO successfully tests laser system. **The Economic Times**, Mumbai, 12 dez. 2017.

GUTHEINZ, L. Laser weapons: The future is now. **Laser Focus World**, v. 42, p. 60-61, 2006.

HÜTZEN, A. *et al.* Polarized proton beams from laser-induced plasmas. **High Power Laser: Science and Engineering**, Cambridge, v. 7, 2019.

ISKANDAROV, K.; GAWLICZEK, P. The second Karabakh war as a war of new generation. **Social Development and Security**, Kyiv, v. 11, n. 2, p. 91-99, 2021.

KILLEEN, Damian; JORDAN, David. RPAS: Future Force or Force Multiplier? An Analysis of Manned/Unmanned Platforms and Force Balancing. **RAF Air Power Review**, London, v. 16, n. 3, p. 10-28, Autumn/Winter 2013.

LAPORTA, J.; FELLER, S. Lockheed contracted to develop airborne laser capability. **UPI**, 6 nov. 2017. Disponível em: https://www.upi.com/Defense-News/2017/11/06/Lockheed-contracted-to-develop-airborne-laser-capability/3711509992968/?utm_source=sec&utm_campaign=sl&utm_medium=1. Acesso em: 17 abr. 2027.

MARCIOTTO, E. R. *et al.* Uso do Lidar Ipen no estudo da evolução da camada limite urbana sobre São Paulo para três dias de verão. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 5. 2007. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2007.

MALYASOV, D. China showcases mobile laser weapon system at IDEX 2019. **Defense Blog**, 17 fev. 2019. Disponível em: <https://defence-blog.com/china-showcases-mobile-laser-weapon-system-at-idex-2019/>. Acesso em: 21 dez. 2022.

MEAKER, M. Ukraine enters a dark new era of drone warfare: a series of deadly attacks using Iranian “suicide drones” shows Russia is shifting gears in the conflict. **Wired**, San Francisco, 21 out. 2022, Disponível em: <https://www.wired.com/story/russia-ukraine-drones-shahed-136-iran/>. Acesso em: 21 dez. 2022.

MOHAN, R.; GROSSHANS, D. Proton therapy: present and future. **Advanced Drug Delivery Reviews**, Amsterdam, v. 109, p. 26-44, 2017.

NASCIMENTO, L. Good kill. **Perspectivas**, v. 7, p. 68-80, 2019.

OLSON, M. History of laser weapon research. **Leading Edge: Directed Energy – Past, Present, and Future**. Dahlgren, VA: Naval Surface Warfare Center, Dahlgren Division, p. 26-35, 2012.

PETROCÍNIO, R. R.; LOURENÇÃO, H. J. Proteção contra ameaças de raios laser: procedimentos de operação e treinamento da Força Aérea Brasileira. **Revista Profissional da Força Aérea dos Estados Unidos**, v. 2, n. 1, 2020. Disponível em: https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/JOTA/Journals/Volume%202%20Issue%201/06-Petrocinio_port2.pdf. Acesso em: 3 jan. 2023.

PHAAL, R.; FARRUKH, C. J. P.; PROBERT, D. R. Technology roadmapping: a planning framework for evolution and revolution. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 71, n. 1-2, p. 5-26, 2004.

PINTO, P. M. X. E. F. Giulio Douhet e John Warden: aspectos evolutivos da teoria do poder aéreo. **Revista Nação & Defesa**, n. 106, 2003. Disponível em: https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/1372/1/NeD106_PedroMiguelXavierEstradaFontesPinto.pdf. Acesso em: 17 abr. 2026.

ROSO, N. A.; MOREIRA, R. C.; OLIVEIRA, J. E. B. High power laser weapons and operational implications. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 6, n. 3, p. 231-236, 2014.

RUSSIA is developing advanced hypersonic weapons: ministry. **Russian News Agency**, Moscow, 19 jan. 2017. Disponível: <http://tass.com/defense/926145>. Acesso em: 17 abr. 2026.

SALUJA, A. Israel's new anti-drone laser weapon system. **Cescube**, [s. l.], 19 set. 2022. Disponível em: <https://www.cescube.com/vp-israel-s-new-anti-drone-laser-weapon-system>. Acesso em: 21 dez. 2022.

SAMAD, R. E.; VIEIRA, N. D. Geometrical method for determining the surface damage threshold for femtosecond laser pulses. **Laser Physics**, New York, v. 16, n. 2, p. 336-339, 2006.

SANDERS, W. D. Space force culture: a dialogue of competing traditions. **Air & Space Operations Review**, [s. l.], v. 1, n. 2, 2022.

SARTI, J. S. O Programa Espacial da Índia: evolução, características e implicações. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 27., 2015, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 2015. Disponível em: http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/137170/Poster_42424.pdf?sequence=2.

STUPL, J.; NEUNECK, G. Assessment of long-range laser weapon engagements: the case of the airborne laser. **Science & Global Security**, Abingdon-on-Thames, v. 18, n. 1, p. 1-60, 2010.

VASCONCELOS, Y. Fibra dopada. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, n. 118, p. 75, 2005.

VIEIRA, N. D. **Aceleração de partículas a laser e suas aplicações**. [S. l.: s. n.], 2018).

WARDEN, J. A. **The air campaign planning for combat**. [S. l.]: National Defense University, 1988.

WATKINS, T. A. Beyond guns and butter: managing dual-use technologies. **Technovation**, Amsterdam, v. 10, n. 6, p. 389-406, 1990.

WEISGERBER, M. Pentagon may create a combatant command for space. **Defense One**, Washington, DC, 6 mar. 2018. Disponível em: <http://www.defenseone.com/technology/2018/03/pentagon-may-create-combatant-command-space/146430/>. Acesso em: 17 abr. 2026.

YI, L. Q. *et al.* Proton acceleration in a laser-induced relativistic electron vortex. **Journal of Plasma Physics**, Cambridge, v. 85, n. 4, 2019.

ZARUBIN, V.; POL'SKIKH, S. D. **From the history of high energy lasers and laser based systems in USSR**. [S. l.: s. n.], [20--?].

APÊNDICE A – Nota sobre o Uso de Inteligência Artificial

No processo de revisão e adequação deste artigo às normas da revista *Coleção Meira Mattos*, utilizou-se o sistema de inteligência artificial Claude (Anthropic) como ferramenta auxiliar em três atividades específicas: 1) revisão bibliográfica complementar, incluindo busca de referências acadêmicas sobre *technology roadmapping* e dados técnicos sobre sistemas laser militares; 2) elaboração do Quadro 1, que compara as tecnologias GDL, COIL e Laser de Fibra, mediante síntese de informações disponíveis em fontes especializadas; e 3) adequação da extensão do texto aos parâmetros editoriais da revista, incluindo revisão de formatação segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Claude é um modelo de linguagem de grande escala (*Large Language Model*, LLM) desenvolvido pela Anthropic, treinado em vastos *corpora* de textos para compreender e gerar uma linguagem natural, operando mediante arquitetura neural baseada em *transformers*, capaz de processar e analisar grandes volumes de informação, identificar padrões textuais e auxiliar em tarefas de síntese, organização e formatação de conteúdo científico. O sistema não substitui o julgamento crítico do pesquisador, mas atua como ferramenta de apoio na gestão e estruturação de dados, mantendo-se todas as decisões de conteúdo, interpretação analítica e argumentação sob responsabilidade exclusiva do autor. A transparência quanto ao uso de ferramentas tecnológicas no processo de produção acadêmica alinha-se às boas práticas de integridade científica e permite a adequada avaliação crítica dos métodos empregados na elaboração deste trabalho.