

Análisis de la importancia de los dispositivos de energía dirigida por láser y el potencial doble uso: perspectivas para una solución brasileña

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

Resumen: El desarrollo y uso de tecnologías de doble uso, entendidas como aquellas adecuadas para uso tanto en aplicaciones civiles como en misiones específicamente militares (con pequeñas adaptaciones o sin ellas), es un fenómeno histórico. Entre las tecnologías avanzadas con posibilidades de doble uso están aquellas basadas en principios de energía dirigida (Armas de Energía Dirigida, AED), que desde hace tiempo han sido objeto de investigación por parte de potencias militares (Estados Unidos, Rusia, China e India), aunque aparentemente estos proyectos aún se encuentran en una fase esencialmente teórica o experimental. A partir de la difusión de la tecnología de Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) o “drones” como arma de guerra efectiva y operativa, especialmente a partir del estallido de conflictos de alta intensidad a principios de los años 2020, el desarrollo de sistemas láser como vectores antiaéreos dirigidos a esta amenaza cobró impulso, incluso varios países anunciaron que los tenían disponibles en sus arsenales, aunque la mayoría de los científicos en el campo de la fotónica tienen una opinión escéptica con respecto a la superación efectiva de los obstáculos técnicos involucrados. En este contexto, se observa el potencial que la tecnología de AED basada en láser de fibra puede desarrollarse en Brasil a partir de esfuerzos de innovación con características de doble uso.

Palabras clave: Tecnología; Doble uso; Láser; Dron; Desarrollo; Brasil.

Abstract: The development and use of dual-use technologies, understood as those capable of being used in 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 apparently remain 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 most 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

Recibido: 20 abr. 2025

Aprobado: 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 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, las tecnologías de doble uso se han descrito como aquellas que se basan en una tecnología central común y se definen por el uso final, y no por los recursos para su desarrollo, pudiendo tener usuarios civiles, militares o ambos (Gummet; Reppy, 1988). Sin embargo, estas tecnologías no solo se limitan a los “artefactos”, sino que también abarcan el conocimiento técnico, incluida la base científica, la experiencia y las habilidades (capital humano, *know-how* y *know why*) de la fuerza laboral. Además, al dominio de los procesos de fabricación y de gestión se suma la comunidad tecnológica necesaria para producir estos artefactos. Un ejemplo es el conocimiento sobre la integración de sistemas (Watkins, 1990).

Entre las tecnologías de doble uso, según el enfoque adoptado, a partir de la primera década del siglo XXI comenzaron a surgir aquellas relacionadas con el control de las fuentes de energía para aplicar en los sistemas de guía y navegación, así como en las propias armas (Avila *et al.*, 2009), genéricamente denominadas armas de energía dirigida (*Directed Energy Weapons* [DEW]).

Según Deveci (Deveci, 2007), a principios de la segunda década del siglo XXI, se catalogaron y se consideraron viables las Armas de Energía Dirigida (AED) que implican la segmentación óptica de haces de energía (láser), la ionización de partículas (plasma) o la modulación de ondas electromagnéticas (microondas).

La palabra “láser” es el acrónimo de la expresión inglesa *light amplification by stimulated emission of radiation*, usualmente traducida como “amplificación de luz por emisión inducida de radiación”. En la práctica, solemos referir al láser cuando tenemos en mente dispositivos que producen Radiación Electromagnética (REM), cuya unidad elemental es el fotón, con características propias. El fotón, según la física cuántica, es simultáneamente onda y partícula. El espectro electromagnético consta de radiación de varias longitudes de onda, pero llamamos luz a aquella banda de radiación que percibe el ojo humano. A diferencia de la luz solar, que es caótica y emite radiación en todas las direcciones y en todo el espectro de longitud de onda, la luz láser es coherente (las ondas están en fase en el tiempo y el espacio), monocromática (tiene la misma longitud de onda), colimada (las ondas tienen la misma dirección, la luz es paralela, no divergente, estrecha, concentrada, de un milímetro de diámetro) y de alta intensidad. El láser ya se utiliza en la investigación científica, en la industria (para cortar materiales de gran dureza, como el acero) y en la medicina (Catorze, 2009).

En el ámbito militar, el láser también se utiliza comúnmente en diversas formas de sensores, pero su aplicación como AED resulta del concepto de proyectar una gran cantidad de energía almacenada por el propio arma sobre un objetivo determinado (por ejemplo: un misil balístico, una aeronave, un satélite, etc.), produciendo este daño estructural o incendiario (Correa; Peron; Vergueiro, 2018).

Brasil también utiliza y fabrica equipos para uso industrial, sanitario, agrícola y de saneamiento, entre otros (Bagnato, 2008), que de alguna manera aprovechan los mismos principios de energía dirigida inherentes a las AED, lo cual hace posible, al menos a nivel hipotético, utilizar los primeros, junto con el conocimiento asociado para el desarrollo o adaptación de las últimas.

Desde el punto de vista militar, el surgimiento de las armas de energía directa (láseres y microondas de alta potencia) tiende a generar repercusiones estratégicas en el sistema internacional

actual, ya que, más que una innovación puntual, la introducción de este nuevo tipo de armas se produciría en el contexto de tres macrotransformaciones que caracterizan nuestro tiempo: la transición de la matriz energética (superación de los combustibles fósiles), la transición demográfica (a escala de miles de millones) y una transición tecnológica (digitalización e industria del conocimiento). De la misma manera que estas transiciones producirán reflejos significativos, aunque aún inciertos desde el punto de vista ecológico, económico, político, etc., nuevas armas estratégicas modificarían potencialmente la distribución del poder en el sistema internacional, aunque los vectores de esta transformación siguen siendo controvertidos (Avila *et al.*, 2009).

La teoría de la disuasión (*deterrence*) adquirió un contenido científico más preciso y una centralidad doctrinal en el entorno del surgimiento de las armas nucleares durante la Guerra Fría. Se trata de una mirada teórica a la lógica de la relación estratégica entre los actores con capacidad de represalia, desarrollada por estrategias civiles, especialmente en Estados Unidos (Bernard Brodie, Henry Kissinger, Thomas Schelling, Herman Kahn, Albert Wohlstetter, etc.), y también en Europa (Raymond Aron, Lawrence Freedman, Colin Gray, etc.), que contempla la idea de disuasión basada en la amenaza creíble de un castigo extremadamente severo hasta el punto de impedir la acción de un adversario, y que pronto adquirió un significado propio, asociado al potencial destructivo de las armas nucleares (Avila *et al.*, 2009).

En esta dirección, al igual que con los tanques y las aeronaves, las armas láser no sustituirán las armas nucleares y sus vectores ni siquiera a muchos de los sistemas de armas convencionales que predominan actualmente, pero tienden a ser armas de disuasión y uso operativo más creíbles que las armas nucleares, ya que permiten un mayor control de los costos humanos de la guerra. Dado que también tienen un menor costo económico y barreras de acceso tecnológico que los arsenales termonucleares, las armas de energía directa por láser pueden nivelar y equilibrar la competencia militar, lo que da como resultado una distribución multipolar más equilibrada en el sistema internacional (Avila *et al.*, 2009).

Las armas láser manipulan diferentes formas de energía electromagnética, dependiendo de los objetivos perseguidos: diodo láser de baja potencia, láser químico de alta potencia, ondas milimétricas o microondas. Sus primeras aplicaciones operativas realistas serían la defensa contra misiles balísticos, incluidos los dispositivos en la órbita espacial de la Tierra, y, con este alcance, se han desarrollado progresivamente desde la década de 1960, en paralelo con una serie de descubrimientos científicos y logros tecnológicos (Correa; Peron; Vergueiro, 2018).

El resultado que genera las armas cinéticas es daño o fuego, que puede ser fatal para el objetivo. Las armas cinéticas se basan en propelentes con energía química u ojivas explosivas, que se proyectan sobre determinado objetivo. Por otro lado, las armas de energía dirigida comparten el concepto de proyectar sobre un objetivo una gran cantidad de energía almacenada por el propio arma, produciendo daños estructurales o incendiarios. Específicamente, se diferencian de las armas cinéticas por producir efectos a la velocidad de la luz, en lugar de velocidades supersónicas o subsónicas, como las armas de proyectiles (LaPorta; Feller, 2017).

La mayoría de la literatura contemporánea agrupa una gama de diferentes armas de energía dirigida, incluidas láser de alta energía (*high energy laser*), microondas de alta potencia (*high power microwave*), armas de haz de partículas y de plasma inducido por láser (*laser induced plasma channel*). Los dos primeros tipos se pueden describir como auténticas armas de energía dirigida, mientras que las armas de partículas se clasificarían mejor como armas de proyectiles, que utilizan partículas atómicas o subatómicas aceleradas a velocidades relativistas (Correa; Peron; Vergueiro, 2018).

Se prevé para la próxima década que habrá una introducción generalizada de armas láser de alta potencia, con capacidad operativa, en el arsenal de Estados Unidos. Estas armas poseerán capacidades únicas para atacar objetivos a la velocidad de la luz, reduciendo considerablemente la eficiencia de muchos dispositivos cinéticos, especialmente misiles balísticos (LaPorta; Feller, 2017).

Sin embargo, el interés por la inminencia del uso común y a gran escala de armas de energía dirigida no es compartido por todos los estudiosos, quienes enfatizan la existencia de barreras significativas para el éxito de las armas láser a corto plazo, en particular la dificultad de transponer soluciones tecnológicas de laboratorio para validarse en el entorno operativo, basadas en conceptos operativos, lógicos y materiales compatibles con la seguridad que se espera de un sistema de armas. También es necesario considerar la definición de una posible política para el uso de estas armas de acuerdo con los conceptos aún vigentes en el derecho y en las costumbres internacionales (Gutheinz, 2006).

2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación adoptó la metodología de la *technology roadmapping* (hoja de ruta tecnológica), una técnica flexible ampliamente utilizada por la industria para apoyar la planificación estratégica y a largo plazo (Phaal; Farrukh; Probert, 2004). Este enfoque proporciona un medio estructurado y, frecuentemente, gráfico para explorar y comunicar las relaciones entre mercados, productos y tecnologías en evolución a lo largo del tiempo. La *roadmapping* tecnológica permite la identificación, evaluación y selección de alternativas tecnológicas estratégicas que apoyen el cumplimiento de los objetivos organizacionales (Camargo *et al.*, 2017).

La recopilación de datos se llevó a cabo a partir de investigaciones bibliográficas sistemáticas en bases de datos académicas reconocidas, como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y Google Académico, y abarcan publicaciones de 2000 a 2023. Las palabras clave utilizadas fueron “*directed energy weapons*”, “*high power laser*”, “*fiber laser*”, “*dual-use technology*” y “*UAV defense systems*”. Además, se realizó un análisis documental de informes técnicos gubernamentales, *white papers* de agencias de defensa y artículos de medios especializados en el desarrollo de armas de energía dirigida en las principales potencias militares (Estados Unidos, Rusia, China e India). La selección de fuentes priorizó los artículos revisados por pares, los informes oficiales y las fuentes primarias, con foco en las publicaciones de los últimos diez años para los datos técnicos, aunque se incluyeron fuentes históricas para la contextualización.

Para mapear la evolución tecnológica e identificar oportunidades de desarrollo nacional, se aplicó específicamente la arquitectura de *roadmapping* genérica propuesta por Phaal, Farrukh y Probert (2004), que integra perspectivas comerciales y tecnológicas a lo largo de un eje temporal. Este método permite identificar *gaps* tecnológicas, anticiparse a las necesidades futuras y alinear los recursos con los objetivos estratégicos. El proceso de *roadmapping* involucró tres fases principales: 1) actividades preliminares, incluida la definición del alcance y el horizonte temporal; 2) desarrollo del mapa tecnológico, con identificación de los requisitos críticos del sistema, especificación de las principales áreas tecnológicas e identificación de alternativas tecnológicas; y 3) actividades de monitoreo, incluida la revisión y la actualización periódica del mapa.

El estudio reconoce las limitaciones metodológicas inherentes a la naturaleza sensible de la información técnica militar, que restringe el acceso a datos operativos precisos y dificulta la

validación independiente de los anuncios gubernamentales sobre los sistemas operativos. Además, el análisis de la capacidad técnica brasileña tiene un carácter exploratorio, con base en información pública y consultas limitadas con especialistas, sin un estudio exhaustivo de la infraestructura nacional disponible. A pesar de estas limitaciones, la metodología de *roadmapping* tecnológica demostró ser apropiada para el análisis prospectivo de tecnologías emergentes en entornos caracterizados por incertidumbres y complejidad técnica, lo cual permite la integración sistemática de múltiples fuentes de información y la identificación de trayectorias tecnológicas viables para el contexto brasileño.

3 ESTADO ACTUAL DEL USO DEL LÁSER EN PLATAFORMAS MILITARES

Además de Estados Unidos, existen programas similares en fase avanzada en la Federación Rusa, en la República Popular China y en la República de la India (Feickert, 2018), aunque Estados Unidos fue el primer país en desarrollar experimentos con potencial militar realista. A principios de los años 1970, ya estaba claro para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos que sería factible un sistema de armas láser aerotransportadas utilizando la tecnología disponible, una idea propagada activamente en los años 1960 por el físico Edward Teller, uno de los creadores de la bomba de hidrógeno. En 1973, la Fuerza Aérea derribó un vehículo aéreo no tripulado en Nuevo México utilizando un láser de gas dinámico (*Gas Dynamic Laser*, GDL); en 1976, el Ejército destruyó algunos vehículos no tripulados con un láser de alta energía (*high energy laser*) en Alabama; y en 1978, la Marina derribó un misil TOW del Ejército con un láser químico en California. Por lo tanto, existen programas de armas de energía dirigida en las tres fuerzas armadas de los Estados Unidos para uso aeroespacial, naval y terrestre.

Para una mejor comprensión de las características técnicas de las principales tecnologías láser de alta potencia desarrolladas para aplicaciones militares, a continuación se presenta un análisis comparativo entre los sistemas GDL, *Chemical Oxygen Iodine Laser* (COIL) y láser de fibra (*fiber laser*) como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1 – Comparación entre tecnologías láser de alta potencia

Característica	GDL	COIL	Láser de Fibra
Longitud de onda	10,6 μm (CO_2)	1,315 μm	$\sim 1,0 \mu\text{m}$
Potencia típica	Alto (clase MW)	Muy alta (clase MW)	Media-alta (50-300 kW)
Eficiencia energética	Alta ($\sim 30\%$)	Moderada ($\sim 20\%$)	Alta (30-40%)
Estado Actual	Obsoleta (años 1970-1980)	Discontinuada (2014)	En desarrollo activo
Suministro de energía	Combustible quemado	Reacción química	Eléctrica (láseres diodo)
Ventajas principales	Alta potencia, buena eficiencia	Potencia extremadamente alta, independencia eléctrica	Compacto, eficiente, modular, buena calidad de haz
Desventajas	Óptica grande, alta absorción atmosférica	Logística compleja, productos tóxicos, alto costo	Potencia limitada, desafíos de propagación
Aplicaciones notables	<i>Airborne Laser Laboratory</i> (ALL) – años 1980	<i>Airborne Laser</i> (ABL) – Boeing 747	M-SHORAD, HELIOS, <i>Iron beam</i> , sistemas anti-dron

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Olson (2012) y Al-Aish (2015).

Como se señaló en el Cuadro 1, la evolución de las tecnologías láser para aplicaciones militares demuestra una clara trayectoria de desarrollo. El GDL, pionero en los años 1970, fue reemplazado progresivamente por COIL en los años 1990 debido a su mayor potencia y una longitud de onda más corta. Sin embargo, ambas tecnologías enfrentaron limitaciones significativas relacionadas con la complejidad logística y los costos operativos. Actualmente, los sistemas basados en láser de fibra representan el estado del arte ofreciendo un equilibrio optimizado entre potencia, eficiencia, compactidad y viabilidad operativa, lo que explica su adopción generalizada en los programas militares contemporáneos.

En el dominio aeroespacial, todavía en 1976, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (United States Air Force, USAF) lanzó el programa de laboratorio láser aerotransportado, el ALL, instalando un dispositivo GDL en un avión de transporte modificado, capaz de rastrear y destruir objetivos aéreos. Aunque experimental, ya tenía como objetivo destruir los misiles balísticos bajo el lema de “paz a través de la luz”. La misma tecnología fue el pilar teórico del programa de defensa antimisiles “guerra en las estrellas” de la administración Reagan (1981-1989), que se empleó con el apoyo de un complejo sistema de espejos adaptativos y sensores previamente posicionados en órbita terrestre (Olson, 2012).

A partir de las lecciones aprendidas durante el programa ALL, USAF lanzó en 1996 otra iniciativa similar, simplemente llamada láser aerotransportado o ABL, esta vez instalando emisores láser químicos infrarrojos de alta energía (*Chemical Oxygen Iodine Laser* –COIL HEL) en aviones Boeing 747 (Olson, 2012).

Prevaleció el concepto de defensa antimisiles, y se diseñó el ABL para utilizarse en tiempos de crisis en patrullas del espacio aéreo vecino al de un país que amenazara con disparar misiles balísticos con ojivas nucleares y otras armas de destrucción masiva, de tal manera que, si hubiera disparos, estos serían derribados en la fase inicial (tropopausa) para asegurarse de que los escombros y las ojivas cayeran sobre el territorio del propio país de lanzamiento. Pero pronto se consideró una segunda aplicación como un arma antisatélite efectiva para destruir o inutilizar satélites o vehículos de reconocimiento espacial en órbita baja. Basado en la tecnología ABL, en 2006 se lanzó la iniciativa del láser táctico avanzado (*Advanced Tactical Laser*, ATL), integrada por sistemas COIL HEL más pequeños y baratos instalados en las plataformas de transporte Hercules AC-130 Spectre, para ataques terrestres en misiones de apoyo cerrado. El sistema fue utilizado con éxito experimentalmente contra objetivos en tierra, en pruebas en Nuevo México (Olson, 2012).

En Rusia, todavía durante el período soviético, había empezado el programa Almaz/Beriev A-60, con el primer prototipo de un aeronave de transporte Ilyushin Il-76 Candid equipada con emisores láser de alta potencia en 1981, y un segundo en 1991. La tecnología de los emisores rusos no se conoce completamente, sin embargo, al considerar la investigación de Almaz con tecnología GDL (la misma experimentada por el programa ALL de Estados Unidos), en sistemas de combate terrestre, los analistas estiman que estos son la base de la plataforma rusa, que sería consistente con la línea teórica Terra-3, diseñada desde el principio para desarrollar defensas de misiles balísticos (Zarubin; Pol ‘Skikh, [20-?]). Los analistas también llaman la atención sobre el hecho de que, después de haber sido expuestos al menos veinte años antes en Rusia, los emisores del sistema ABL norteamericano presentados en 2006 parecen adoptar la misma configuración.

En 2016, el centro de investigación y desarrollo de la empresa Almaz anunció la finalización de una versión modernizada del programa A-60. El Ministerio de Defensa de la Federación Rusa publicó una nota oficial del viceministro de Defensa, Yuri Borisov, según la cual afirmaba

que el país tenía armas láser basadas en una tecnología conocida y confiable, ya no en etapa experimental, listas para comenzar a operar en plataformas aéreas entre 2020 y 2022 (Rusia [...], 2017), un hecho aparentemente reafirmado por el informe de 2018 del Director de Inteligencia Nacional de los Estados Unidos al Congreso de Estados Unidos (Coats, 2018).

La República Popular China había contado con programas de armas de energía dirigida basados principalmente en tecnologías de láser químico infrarrojo (COIL) y láser de electrones libres (*Free Electron Lasers* [Fel]), además de una serie de iniciativas que utilizan láser en diferentes modalidades (principalmente terrestres y de baja intensidad), que no se consideran en este estudio. Los primeros experimentos en la década de 1960 se realizaron con láseres de estado sólido (*Solid State Lasers* [SSL]) de baja potencia.

El desarrollo de la tecnología FEL estaría a cargo de la Academia China de Ingeniería y Física, y resultó en la activación del dispositivo SG-1 en 1993. Por otro lado, la tecnología COIL se asignó al Instituto Dalian de Química y Física desde la década de 1980, que llevó a la primera prueba de un dispositivo con un alcance de 140 kilómetros en 1993.

China parece concentrar sus esfuerzos en plataformas de ataque en grandes bases terrestres, con emisores dirigidos a objetivos en órbita terrestre baja, es decir, con un objetivo principal antisatélite. Un artículo científico de 2013 reveló la realización de un experimento exitoso en 2005 que dañó un satélite en órbita a aproximadamente seiscientos kilómetros mediante un láser entre cincuenta y cien kilovatios de potencia posicionado en la provincia de Xinjiang (Gao; Zhou; Wang, 2013). Esto está en línea con la estrategia china de basar otros sistemas de largo alcance en tierra, como los misiles hipersónicos antibuque.

Por otro lado, esta estrategia podría señalar la dificultad china para miniaturizar las estructuras para acondicionar elementos químicos y generar grandes cantidades de energía, necesarias para el uso de sistemas de energía dirigida, es decir, podrían quedar un paso atrás de los programas estadounidense ALL/ABL y ruso A-60. A pesar de esto, hay informes de que en un evento militar de octubre de 2009 se reveló una prueba exitosa de una aeronave cuatrimotor que utilizaba un dispositivo láser para atacar un satélite, basado en una plataforma previamente anunciada de equipos producida por Xian Aircraft Corporation. Se prevé que China pueda tener un programa láser aerotransportado con tecnología COIL, pero que, a diferencia de los sistemas ruso y estadounidense destinados al uso antimisil, la plataforma china estaría diseñada principalmente para uso antisatélite (Fisher Jr., 2017).

La República de la India se incorporó a la escena del desarrollo de armas de energía dirigida hace relativamente poco tiempo, y al parecer en respuesta a la amenaza china a su propio programa espacial, que se desarrolló en paralelo al esfuerzo de la India por desarrollar misiles balísticos y de su programa nuclear. El programa espacial de la India comenzó en la década de 1960, con el apoyo de Estados Unidos, Francia y Alemania, principalmente en el área de los satélites. El programa de vehículo lanzador fue en paralelo, con el objetivo no declarado de desarrollar el sistema de misil balístico intercontinental Agni-V.

La situación geoestratégica de India está condicionada por la constante amenaza de los países vecinos, especialmente China y Pakistán, con los que ya libró guerras en el siglo XX, así como por los constantes conflictos en las zonas fronterizas. Al igual que la India, tanto China como Pakistán tienen arsenales nucleares y misiles balísticos. Por lo tanto, es esencial que India mantenga sistemas tanto ofensivos como defensivos en el campo aeroespacial, capaces de reaccionar contra una posible agresión de las naciones enfrentadas.

En este contexto, y a partir de 2008, India incrementa las inversiones de carácter militar en el sector espacial (Sarti, 2015). Con este fin, la Organización de Investigación y Desarrollo de la Defensa (*Defense Research and Development Organisation* [DRDO]) habría iniciado a partir de 2014 el desarrollo de un sistema de armas de energía dirigida antimisil y antisatélite. Se exploraría la tecnología COIL y de láser de fibra de alta potencia (*highpower fiber laser*) para uso estratégico (Bose, 2014).

En diciembre de 2017, DRDO anunció una exitosa prueba de una plataforma láser de un kilovatio instalado en un camión en Chitadurga en presencia del ministro de Defensa, Arun Jaitley. No está claro qué principio fue utilizado por el dispositivo en esta prueba, pero hay informes de que el Centro de Ciencia y Tecnología Láser (*Laser Science & Technology Centre*, LASTEC) viene trabajando en un proyecto con las mismas características, basado en la tecnología COIL. LASTEC también estaría diseñando un sistema llamado “Aditya” basado en la tecnología de láser de gas dinámico (GDL), el mismo principio utilizado por ALL de Estados Unidos y por el ruso A-60 (Gurung, 2017).

Todavía no se prevé la instalación de un sistema equivalente para las pruebas a bordo de la aeronave, sin embargo, hay estudios de una versión aerotransportada del sistema de microondas (otra clase de armas de energía dirigida) *Kilo Ampere Linear Injector* (KALI), en una aeronave Ilyushin Il-76, la misma utilizada por el proyecto ruso A-60. Teniendo en cuenta el tamaño, el tipo de sensores para la adquisición de objetivos y las características de un dispositivo de energía dirigida por microondas, es razonable pensar también que se puede usar un sistema láser en la misma plataforma.

En Brasil, el desarrollo de la investigación con láser y la formación de los recursos humanos correspondientes se desarrollan principalmente en el Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) y en el Instituto de Estudios Avanzados (IEA), ambas dependencias del Departamento de Ciencia y Tecnología Aeroespacial (DCTA), parte de la estructura del Comando Aeronáutico, durante aproximadamente treinta años, con avances en el área de láser de alta potencia (*high power laser* [HPL]). Aunque todos estos proyectos de investigación tienen una doble naturaleza (civil-militar), la Fuerza Aérea Brasileña (FAB) dedica especial atención al desarrollo de armas láser desde el año 2000. En estos estudios, la tecnología que se ha considerado más adecuada para los proyectos de armas de energía dirigida por láser sería COIL, en vista de las ventajas tácticas relacionadas con las necesidades de energía y de transporte de “cartuchos” químicos de dimensiones adecuadas a los posibles vectores disponibles (Roso; Moreira; Oliveira, 2014).

Los estudios relevantes sobre tecnologías láser, incluida la alta potencia, también han sido desarrollados por el Centro de Láseres y Aplicaciones, del Instituto de Investigación Energética y Nuclear (CLA-Ipen), un instituto de investigación civil vinculado a la Secretaría de Desarrollo Económico, Ciencia, Tecnología e Innovación del Gobierno del Estado de São Paulo, con el objetivo principal de aplicarse en las áreas de salud, procesamiento de materiales, monitoreo ambiental y área nuclear (Marciotto, 2017).

El análisis de los diversos programas láser permite prever que, si bien existen grandes expectativas respecto al uso de armas de energía dirigida actuando sobre este principio, tanto en el ámbito aeroespacial como el espacial, cuyos límites parecen desaparecer dado el posible alcance de estas emisiones (Ellis, 2015), la realidad de los sistemas operativos (o cercanos a la operatividad) indica dos usos actuales: la defensa antimisiles balísticos y el uso antisatélite.

Las iniciativas de China e India, en su mayoría concentradas en grandes complejos en tierra, están aparentemente dirigidas a estos fines, y no existe una perspectiva realista de que los sistemas aerotransportados estén disponibles para ambos países a corto o mediano plazo.

Los programas rusos más avanzados y, según la evidencia disponible, en estado de preparación operativa (o a punto de alcanzarla) contemplan la posibilidad concreta de sistemas de armas de energía dirigida por láser basados en tecnología GDL en vectores aerotransportados. Sin embargo, la doctrina laboral rusa apunta igualmente al uso antimisil y antisatélite.

Por otro lado, los diversos programas estadounidenses nos permiten prever el uso de armas láser más en el dominio aeroespacial, ya sea en plataformas aerotransportadas o en sistemas combinados de transmisores en tierra con dispositivos en órbita. Aun así, no hay indicios seguros de que el uso táctico de la iniciativa ATL esté en funcionamiento o a punto de estarlo.

Se teorizan y se estiman para la década de 2040 proyectos mucho más ambiciosos para establecer plataformas orbitales equipadas con sus propios emisores de energía dirigidos por láser, para uso antisatélite, antimisil e incluso táctico contra objetivos en la superficie terrestre (Friedman, 2009). Al respecto, un paso decisivo dado por Estados Unidos fue la creación, en 2019, de una Fuerza Espacial independiente, desplegada desde la Fuerza Aérea, con personal y equipos propios (Sanders, 2022).

3.1 Sistemas láser para uso contra vehículos aéreos no tripulados

Asimismo, la introducción de otra tecnología, relativamente nueva y mucho más barata en los años 2010, que ha mostrado un efecto disruptivo inimaginable en los campos de batalla recientes, encuentra en los dispositivos láser una respuesta, aparentemente, más efectiva que otras alternativas en uso o imaginadas.

Esta es la introducción de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), más comúnmente conocidos en la versión en inglés como *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) o, más popularmente, drones. En octubre de 2002, un misil Hellfire lanzado de un VANT Predator impactó contra el vehículo que transportaba a uno de los responsables de los ataques contra el barco estadounidense *USS Cole* dos años antes, iniciando una nueva estrategia antiterrorista basada en ataques con drones. Un total de 563 ataques se efectuaron en los dos mandatos del presidente Obama en Estados Unidos, lo que corresponde a diez veces el número de ataques llevados a cabo por su predecesor, George W. Bush. Desde entonces, varios países se dieron cuenta de las posibilidades de agregar este tipo de equipos a sus arsenales (Nascimento, 2019).

Un VANT se puede definir como “*una máquina voladora que no contiene un ser humano. Es distinto de un arma guiada, como una bomba guiada por láser o un misil crucero, ya que no es un vehículo de descarga de ojivas de un solo uso. Un VANT puede ser pilotado remotamente o puede ser autónomo*” (Killeen; Jordan, 2013, p. 13, nuestra traducción). La principal ventaja de los VANT es que no requieren un ser humano a bordo. No solo el aspecto político de las víctimas humanas, sino también la ausencia de fatiga y hambre, su capacidad para ocultar de la opinión pública el uso de la fuerza, junto con el hecho de que son relativamente baratos, los convierten en un elemento tan atractivo (Nascimento, 2019).

En los dos conflictos bélicos en el sentido tradicional, a principios de los años 2020, el uso de drones demostró ser intenso, causando daños más allá de las expectativas, e incluso contra adversarios más poderosos y supuestamente más avanzados, como se ha visto en este último caso durante el conflicto ruso-ucraniano.

A partir del 27 de septiembre de 2020, las Fuerzas Armadas de Armenia comenzaron una ofensiva de primera línea en la disputada región de Nagorno-Karabaj, lo cual generó una contraofensiva por parte de las fuerzas azerbaiyanas y dio lugar a lo que se conoció como la “guerra de los 44 días”. En total, durante los 44 días de guerra, alrededor de 1.500 posiciones de defensa aérea armenia, sistemas de artillería, blindados y otros vehículos fueron destruidos, principalmente, por fuerzas azerbaiyanas con el uso de VANT de fabricación turca, lo cual llevó a su victoria y la reconquista de una región que se había reivindicado durante años (Iskandarov; Gawliczek, 2021).

En el conflicto ruso-ucraniano que comenzó el 24 de febrero de 2022, aunque todavía son raros los artículos científicos que presentan una visión más objetiva del mismo, se dieron a conocer daños importantes a las posiciones y medios de combate rusos causados por drones ucranianos en las etapas iniciales del conflicto, principalmente de fabricación turca, a pesar de que las fuerzas rusas disponían de sistemas de microondas de alta potencia que supuestamente podrían neutralizar este equipo (Burdon, 2017). Sin embargo, más recientemente, al darse cuenta de la letalidad y de la flexibilidad de estas plataformas, las fuerzas rusas también comenzaron a usar significativamente drones contra las fuerzas e infraestructura ucranianas, al parecer utilizando sistemas no tripulados de fabricación iraní (Meaker, 2022).

En ambos casos, se registró una ineficiencia general de los sistemas de detección y artillería anti-aérea tradicional, debido a la baja altitud y dimensiones relativamente pequeñas de los VANT, que, además, pueden lanzarse de manera improvisada desde pequeñas plataformas que se mueven rápidamente.

La amenaza se vuelve aún mayor cuando se utiliza el concepto táctico de “enjambres de drones” (*drone swarms*). Los VANT se caracterizan por su pequeño tamaño y alta maniobrabilidad, sus costos de producción baratos, la posibilidad de que un solo operador controle simultáneamente varios drones y que los drones sean semiautónomos o incluso totalmente autónomos. Cuando se toman en conjunto, estas características hacen viable el surgimiento de estrategias ofensivas basadas en ataques masivos de múltiples unidades o, en otras palabras, ataques de “enjambre de drones” (Guitton, 2021).

Varios países, debido a la presión por la necesidad de estos vectores de combate que causaron innovaciones disruptivas en el campo de batalla, y por la aparente ineficacia de los sistemas de microondas de alta potencia que, en teoría, podrían detenerlos, también comenzaron a acelerar los programas láser de alta potencia para uso táctico y antiaéreo desde plataformas más pequeñas y con un alcance más restringido.

Los datos más confiables sobre la funcionalidad efectiva de los sistemas están restringidos y rodeados de secreto. Además, la difusión de noticias inexactas sobre las capacidades militares también se utiliza como una forma de ejercer influencia y se convierte en una estrategia de guerra psicológica.

Aun así, hay noticias de repositorios relativamente confiables con noticias creíbles de sistemas antiaéreos láser.

A mediados de 2022, y tras veinte años de investigación, el Ministerio de Defensa del Estado de Israel anunció la noticia de la operación de un prototipo completamente funcional llamado genéricamente “Iron Beam” (“haz de hierro” en traducción libre), un paralelo evidente con el sistema de misiles de defensa aérea llamado “Iron Dome” (“cúpula de hierro”), exitoso en la protección contra cohetes lanzados desde territorios palestinos.

El aparato consistiría en un láser con output de cien kilovatios capaz de impactar un VANT a una distancia máxima de veinte kilómetros. Hay indicios de que sería un láser químico (Saluja, 2022).

Figura 1 – Prueba del sistema Iron Beam



Fuente: Rafael Defense Systems/Ministerio de Defensa de Israel.

China también anunció, incluso como producto disponible para la venta, un sistema táctico láser antidrones llamado “Silent Hunter” producido por la empresa Poly Technologies, disponible en versiones fija y móvil. Consiste en un láser de fibra óptica alimentado por energía eléctrica con una potencia máxima de entre treinta y cien kilovatios, y un alcance máximo de cuatro kilómetros. Se afirma que sería capaz de penetrar cinco placas de acero de dos milímetros a una distancia de ochocientos metros, o una sola placa de acero de cinco milímetros a ochocientos metros, y que también tiene una capacidad secundaria contra objetivos terrestres (Malyasov, 2019). La tecnología utilizada sería la del láser de fibra, ya como una rama de otro sistema llamado LW-30 (China Military Drone Alliance, 2022).

Figura 2 – Silent Hunter *mobile laser system* en la exposición de armas IDEX 2019, en Abu Dhabi



Fuente: tokyo-dar/Defence Blog.

Entre otros sistemas de este tipo, con menos datos disponibles, la empresa Raytheon de Estados Unidos anunció la oferta de un equipo móvil transportado desde un vehículo utilitario llamado *High-Energy Laser Weapon System* (HELWS). Tendría un alcance de tres kilómetros y sería una rama de un vehículo más grande, transportado por un vehículo blindado Stryker, llamado *Directed Energy Maneuver-Short Range Air Defense* (DE M-SHORAD), con mayor potencia (cincuenta kilovatios), este último con alcance y rendimiento no informados. Ambos indican el uso de un láser de alta potencia modular, compatible con tecnologías láser químicas o de fibra.

Figura 3 – HELWS montado en un vehículo Polaris MRZR (*dune buggy*)



Fuente: Raytheon.

Figura 4 – DE M-SHORAD montado en un blindado Stryker



Fuente: Raytheon.

La presentación de algunos programas de sistemas de armas láser ya en la “fase operativa” parece demostrar que, para esta clase de equipos, de corto o mediano alcance, se superaron algunos de los desafíos técnicos identificados a lo largo de la investigación, objeto de comentarios adicionales a continuación, que también pueden indicar que son objetivos viables para el desarrollo nacional, con capacidades instaladas ya existentes en Brasil.

Como ya se ha mencionado en otra parte de este trabajo, debido a su propia naturaleza estratégica, existen limitaciones significativas en el acceso directo a programas y tecnologías ya desarrollados o en desarrollo en Brasil, ya sea en el propio ámbito militar o en la academia, ya que, además del aspecto de seguridad, existen repercusiones relevantes en el campo de la propiedad intelectual (propiedad industrial y derechos de autor) que desalientan la presentación de más detalles.

Conscientes de estas limitaciones desde el inicio del proyecto, se adoptó un protocolo de interacciones institucionales y profesionales comprometido con la preservación de datos que, considerados individualmente, pueden ser confidenciales, incluso si finalmente se accede en la investigación, así como el mantenimiento de la confidencialidad de la fuente, cuando se solicite. Así, parte de lo obtenido durante el trabajo de campo y en las entrevistas está referenciado de manera limitada.

Con base en la metodología de investigación de *technology roadmapping* (Camargo *et al.*, 2017) adoptada en el plan de trabajo, se identificaron varios programas académicos actualmente dirigidos a la investigación con *láser* de alta potencia –que son de interés para nuestro estudio–, destacando: 1) los laboratorios láser mantenidos por la División de Fotónica, del Instituto de Estudios Avanzados (IEAv) de DCTA; y 2) el CLA del IPEN.

Los primeros al estar vinculados al Comando de la Aeronáutica presumiblemente desarrollan aplicaciones dirigidas al área de defensa, como lo indica los trabajos de Roso, Moreira y Oliveira (2014). Sin embargo, se rechazaron los intentos de contacto a lo largo de la fase de trabajo de campo.

Por otro lado, los contactos con IPEN recibieron respuestas positivas y fueron útiles tanto para la comprensión general y teórica de las oportunidades y desafíos respecto al uso de láseres de alta potencia, tales como armas de energía dirigida, como para algunos proyectos en curso, incluidos el proyecto considerado más factible para el desarrollo dual.

Por otra parte, se encontró información sobre otros proyectos que estarían en marcha en el Instituto Senai de Innovación en Sistemas de Fabricación y Procesamiento Láser, en el estado de Santa Catarina, con objetivos duales, junto con el Comando del Ejército (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE SANTA CATARINA, 2016). Resulta que en consultas con el mencionado instituto de investigación se verificó que efectivamente no existe un proyecto en curso con sesgo de defensa, aunque ha sido acreditado para recibir fondos de la Empresa Brasileña de Investigación e Innovación Industrial (Embrapii), dirigido al segmento industrial en tres áreas: 1) fabricación aditiva por láser; 2) tratamiento de superficies con láser; y 3) soldadura y corte con láser, esta última sería más orientada a un proyecto de doble uso, ya que implica el proceso de desarrollo de láseres de alta potencia.

Bajo el Comando del Ejército, se identificó un interés más inmediato de la fuerza terrestre en investigaciones que involucran el desarrollo de sistemas láser de fibra, lo que parece ser consistente con la posible aplicación de sistemas láser de alta potencia para fines antiaéreos (especialmente antidron), similares a los anunciados como ya disponibles para uso operativo e incluso comercialización.

Los láseres de fibra son láseres de estado sólido, es decir, láseres que utilizan un componente sólido como medio activo en lugar de líquidos o gases, en los que una fibra óptica se dopa con un pequeño porcentaje de tierras raras (específicamente erbio –Er⁶⁸). Los diodos se utilizan para estimular el material generador, que emite fotones a la longitud de onda específica del elemento utilizado para el dopaje. Es una especie de láser que existe desde hace años a bajas potencias, pero solo más recientemente ha podido alcanzar altas potencias, superiores a los cuarenta kilovatios (Coelho; Lima; Costa, 2013).

El dopaje, a su vez, consiste en introducir un elemento químico para cambiar las propiedades de un material. En este caso, el erbio sirve para amplificar la señal luminosa que se propaga en los cables ópticos en forma de láser. Esto es fundamental, porque cuando la luz viaja a través de una red óptica, es absorbida, y su señal se atenúa. Para recuperar la amplitud de la señal original, la solución consiste en instalar amplificadores ópticos a lo largo de la red, cuyo componente principal son las fibras de erbio (Vasconcelos, 2005).

Los láseres de fibra funcionan con electricidad, lo que los hace más fáciles de transportar y mantener en el campo de batalla. Los láseres de fibra óptica utilizan fibras ópticas como medio de ganancia. Para fines militares, en la mayoría de los casos, el medio de ganancia es una fibra dopada con tierras raras, como erbio, neodimio (Nd⁶⁰), iterbio (Yb⁷⁰), tulio (Tm⁶⁹) o praseodimio (Pr⁵⁹). Los diodos se utilizan para el bombeo (Benzoni; Orletsky, 1989). Los láseres de fibra son robustos y no requieren una sala limpia para funcionar o mantenerse como la mayoría de los láseres, además de ser muy eficientes. Sin embargo, no funcionan bien en todas las condiciones climáticas.

Un ejemplo es el láser de fibra de onda continua (*continuum wave fiber laser*), que produce haz de calidad moderada, causando daños a los materiales y a los componentes mediante el calentamiento térmico y la perforación por calor (*burn-through*). Este tipo de láser es más fácil de armar debido a las fibras flexibles.

Figura 5 – Sistema láser de fibra con salida continua



Fuente: Olson (2012).

En esta dirección, parece ser una tecnología propicia para el transporte en vehículos de superficie de tamaño medio (camiones) o vehículos blindados, separados (por ejemplo: un camión transporta los generadores y/u otro el sistema láser en sí mismo) o armados en una sola estructura.

4 PROYECTO DE DESARROLLO LÁSER PARA PROTONTERAPIA EN EL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS Y NUCLEARES

Con base en estas características del láser de fibra, se identificó un proyecto en el IPEN, con el objeto de acelerar las partículas por láser (*wakefield particle acceleration*), en colaboración con la Universidad de Nebraska, en Lincoln (UNL).

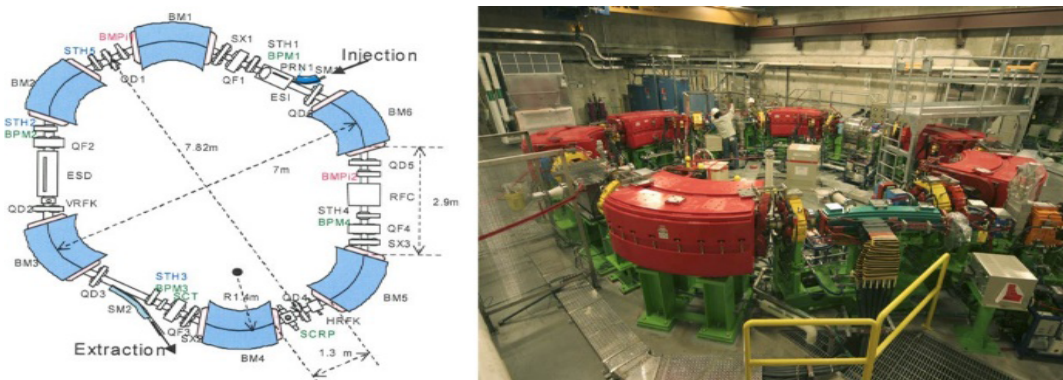
En el momento en que los pulsos del láser de alta intensidad inciden sobre un objetivo, sus átomos se ionizan, y los electrones pasan a interactuarse con el campo electromagnético del láser, lo cual son acelerados directamente por el campo luminoso (fuerza de Lorentz o fuerza ponderomotriz). Los electrones y los iones se separan, y se forma un plasma. Para objetivos sólidos y delgados, el pulso pasa a través del material seguido de una nube de electrones (envoltura) que viaja a una velocidad relativista. Los iones restantes en el objetivo son atraídos por los electrones y repelidos entre sí, produciendo un haz de protones y una corriente de hadrones. Esta técnica se utiliza en sistemas de PW para producir haces de protones de 100 MeV. Otro poderoso método de aceleración de electrones es *Laser Wakefield Plasma Acceleration* (LWPA), basado en la idea de producir un campo eléctrico longitudinal en el plasma para aumentar los electrones (Vieira, 2018).

El objetivo de este proyecto es colaborar en el establecimiento de nuevos regímenes de aceleración de partículas con fines médicos, especialmente para la llamada protonterapia para enfermedades neurooncológicas (tumores cerebrales), en que el haz de protones llega directamente al tumor y no lo atraviesa hacia los tejidos cerebrales sanos.

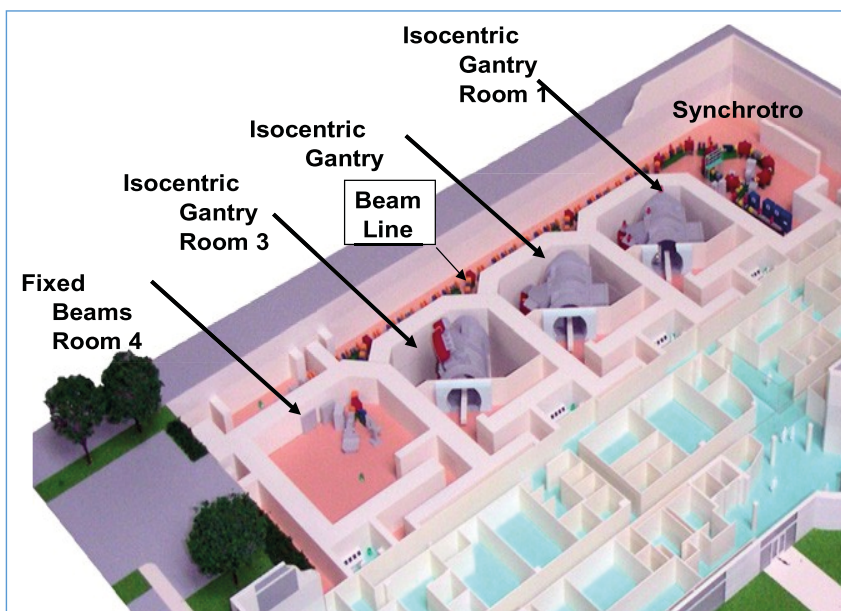
Aunque este no es un tratamiento completamente nuevo, se estima que solo hay 107 unidades que utilizan tecnología de terapia de protones, concentrada en unos pocos países, debido al precio, ya que un acelerador de partículas de protones para este propósito es muy costoso, aproximadamente USD 40 millones por equipo, además del costo de la operación y mantenimiento realizados por las pocas empresas que poseen la tecnología.

La tecnología habitual para un centro de protonterapia implica el uso de grandes instalaciones de ciclotrones o sincrotrones, que aceleran las partículas subatómicas (protones), y luego las distribuyen a salas donde equipos especializados realizan la aplicación en sí. El conjunto completo requiere un edificio propio (Mohan; Grosshans, 2017).

Figura 6 – Sincrotrón del Anderson Proton Therapy Center



Fuente: Mohan y Grosshans (2017).

Figura 7 – Diseño del Anderson Proton Therapy Center

Fuente: Mohan y Grosshans (2017).

Por otro lado, los modelos teóricos y experimentales de aceleración de partículas a través de haces de láser indican que, además de una disminución sustancial en el tamaño de los equipos e instalaciones, también existe la perspectiva de una disminución sustancial en los diversos costos asociados. La aceleración impulsada por láser ofrece una alternativa muy prometedora al posibilitar energías iónicas mucho más altas (Hützen *et al.*, 2019), a través de técnicas como las técnicas de vórtice de electrones relativista inducido por láser en plasma de densidad casi crítica (*laser-induced relativistic electron vortex*, EV, *in a near-critical-density*, NCD, *plasma*) (Yi, 2019).

El potencial de doble uso, en este caso, es muy alto en el ámbito civil, en que la tecnología puede mitigar el sufrimiento de numerosas personas que padecen cáncer, como los niños, además de ahorrar recursos públicos destinados a cubrir los costos de largos períodos de radiofármacos. Además, el carácter médico de la tecnología tiende a ofrecer menos resistencia al acceso al conocimiento y a los materiales sensibles, además de facilitar la aportación de grandes recursos financieros disponibles al sistema de salud, incluso desde el extranjero y sin necesidad de reembolso.

Desde una perspectiva militar, la tecnología y los conocimientos científicos asociados pueden ayudar a superar varias fases críticas del desarrollo de un sistema de energía dirigida antiaérea, como las que se ha descrito anteriormente.

Los mismos desafíos de producción y acumulación de energía como los del láser de fibra sirven tanto para energizar el generador de vórtices de electrones del acelerador de protones como para energizar un emisor de láser de alta potencia. Las mismas soluciones necesarias para el cálculo nanométrico de “objetivos” neoplásicos en tres dimensiones dentro de las cavidades del cuerpo humano (Samad; Vieira, 2006) se pueden adaptar para calcular el disparo de pulsos de alta potencia contra objetos en el espacio aéreo tridimensional.

Por otro lado, es necesario resaltar que, a pesar de la afirmación pública realizada por varios países y empresas de que disponen de manera operativa de sistemas con láseres de alta potencia, la comunidad académica consultada sigue siendo escéptica sobre la superación de algunos desafíos físicos inmutables (Stupl; Neunek, 2010).

El mayor desafío parece residir en la atenuación atmosférica, que afecta la propagación del haz del láser, ya que el vapor de agua presente naturalmente en la mezcla de aire, nubes, aerosoles y partículas de polvo puede absorber o reflejar la energía láser (Al-Aish, 2015). Otro desafío significativo radica en la necesidad de una línea de visión directa entre el emisor y el objetivo, ya que los haces no describen una trayectoria balística ni son capaces de causar un efecto por una explosión cercana al objetivo (Roso; Moreira; Oliveira, 2014).

Además, cuando se aplica un láser de alta potencia contra un objetivo que no absorbe toda la energía, esta tiende a reflejarse en forma de iluminación intensa, que puede generar daños graves en la retina de las tropas aliadas y enemigas; en este último caso se viola el Cuarto Protocolo Adicional a la Convención sobre Prohibiciones o Restricciones del Empleo de Ciertas Armas Convencionales que Puedan Considerarse Excesivamente Nocivas o de Efectos Indiscriminados sobre Armas Láser Cegadoras de 1995, y, así, se caracteriza potencialmente crímenes de guerra (Petrocínio; Lourenção, 2020).

5 CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación, se pudo concluir que los sistemas de armas de energía dirigida por láser de alta potencia son teórica y técnicamente factibles para aplicaciones tácticas principalmente contra VANT, basadas en el desarrollo de tecnologías como los láseres de fibra mediante proyectos que involucren la triple hélice de la academia, el gobierno y la industria, empleando conocimientos, profesionales y tecnologías ya existentes y disponibles en el territorio brasileño, con una doble vocación.

Sin embargo, aún quedan desafíos técnicos por superar. El dominio completo del ciclo de producción de haces de láser de alta potencia en Brasil aún no es una realidad, y el carácter estratégico y revolucionario de esta clase de armas hace que sea poco probable proporcionar sistemas listos y transferencia de tecnología de operadores que pueden haber superado los obstáculos físicos a la propagación del láser en la atmósfera, así como la designación de objetivos en efectivo movimiento en el campo de batalla, y no simplemente estáticos y en condiciones ideales de temperatura y presión, como aquellos presentados en los ensayos publicados.

Desde el punto de vista de la gestión financiera y de personal, se entiende que la vinculación de los programas de doble uso con el láser en el área de salud es el mecanismo institucional más apropiado en este momento histórico al tener en cuenta una disponibilidad de recursos financieros, materiales y humanos más abundante para el sector salud que para el sector de la defensa; a pesar de esto, puede y debe generar conocimientos, habilidades de integración y algunos recursos financieros que de otro modo no estarían disponibles únicamente en el ámbito civil.

REFERENCIAS

- 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. Disponible en: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/APTA>. Accedido en: 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. Disponible en: <https://www.mobilityengineeringtech.com/component/content/article/45802-afit-0006>. Accedido en: 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. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10945/3311>. Accedido en: 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>. Acessado em: 21 dic. 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. Acessado em: 23 dic. 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>. Acessado em: 3 enero 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. Acessado 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>. Acessado 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/>. Acessado em: 21 dic. 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/>. Acessado em: 21 dic. 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. Acessado em: 3 enero 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://comun.rcaap.pt/bitstream/10400.26/1372/1/NeD106_PedroMiguelXavierEstradaFontesPinto.pdf. Acessado 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>. Acessado em: 21 dic. 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. Disponible en: <http://www.defenseone.com/technology/2018/03/pentagon-may-create-combatant-command-space/146430/>. Accedido en: 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--?].

APÉNDICE A – Nota sobre el Uso de la Inteligencia Artificial

En el proceso de revisión y adaptación de este artículo a las normas de la revista *Coleção Meira Mattos*, el sistema de inteligencia artificial Claude (Anthropic) se utilizó como herramienta auxiliar en tres actividades específicas: 1) revisión bibliográfica complementaria, incluida la búsqueda de referencias académicas sobre *technology roadmapping* y datos técnicos sobre sistemas láser militares; 2) elaboración del Cuadro 1, que compara las tecnologías GDL, COIL y Láser de Fibra mediante la síntesis de información disponible de fuentes especializadas; y 3) adaptación de la extensión del texto a las normas editoriales de la revista, incluida la revisión de formato de acuerdo con las normas de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT). Claude es un modelo de lenguaje a gran escala (*Large Language Model*, LLM) desarrollado por Anthropic, con vasto *corpora* de textos para comprender y generar un lenguaje natural y que opera a través de una arquitectura neuronal basada en *transformers*, capaz de procesar y analizar grandes volúmenes de información, de identificar patrones textuales y de ayudar en tareas de síntesis, organización y formato de contenido científico. El sistema no sustituye el juicio crítico del investigador, sino que es una herramienta de apoyo en la gestión y estructuración de los datos, manteniendo todas las decisiones de contenido, interpretación analítica y argumentación bajo la exclusiva responsabilidad del autor. La transparencia en el uso de herramientas tecnológicas en el proceso de producción académica está en línea con las buenas prácticas de integridad científica y permite una adecuada evaluación crítica de los métodos utilizados en la elaboración de este trabajo.