

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CMG FERNANDO DE OLIVEIRA MARIN

UMA PERSPECTIVA PARA O DESENVOLVIMENTO NACIONAL DE TECNOLOGIA  
LASER EM ARMAS DE ENERGIA DIRECIONADA:  
EMPREGO EM MEIOS NAVAIS E USO DUAL PARA A SOCIEDADE BRASILEIRA

Rio de Janeiro

2022

CMG FERNANDO DE OLIVEIRA MARIN

UMA PERSPECTIVA PARA O DESENVOLVIMENTO NACIONAL DE TECNOLOGIA  
LASER EM ARMAS DE ENERGIA DIRECIONADA:  
EMPREGO EM MEIOS NAVAIS E USO DUAL PARA A SOCIEDADE BRASILEIRA

Tese apresentada à Escola de Guerra Naval,  
como requisito parcial para a conclusão do  
Curso de Política e Estratégia Marítimas.

Orientador: Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida

Rio de Janeiro  
Escola de Guerra Naval

2022

A meu pai Oswaldo (*in memoriam*), minha mãe Clarice, meus irmãos Elisangela e Orlando, minha esposa Andréa e minha filha Ana Clara, pelo carinho e precioso suporte para a conclusão desta etapa.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que tenho e sou.

Ao Prof. Dr. Nival Nunes de Almeida, pela fidalguia, profissionalismo e fraternal orientação. Mesmo em momentos destinados ao seu descanso, não poupou esforços para nortear a construção do presente trabalho, com preciosos ensinamentos.

À Dra. Fernanda das Graças Corrêa, da Secretaria de Produtos de Defesa (SEPROD), e ao Prof. Dr. Jesse Werner Costa, docente da Escola Naval e pesquisador do Instituto Militar de Engenharia (IME), por enriquecerem o presente trabalho com suas experiências.

Aos docentes do Curso de Política e Estratégia Marítimas (C-PEM) 2022 que, com cordialidade e primorosa pedagogia, demonstraram empenho solícito na transmissão dos conhecimentos.

Ao Capitão de Mar e Guerra (RM1) Alexandre Motta de Sousa, ao Capitão de Corveta Eduardo Miranda da Fonseca e demais membros da equipe do C-PEM, pelo extraordinário apoio e assistência que forneceram ao longo do Curso.

Ao Vice-Diretor da Escola de Guerra Naval (EGN), Capitão de Mar e Guerra Fernando Luís de Carvalho Viana, pelo apoio administrativo ao C-PEM.

Ao Contra-Almirante (RM1) Eduardo Augusto Wieland, Superintendente de Ensino da EGN, por fomentar um ambiente profícuo para interações profissionais e acadêmicas.

Ao Diretor da EGN, Contra-Almirante João Alberto de Araujo Lampert, pela especial atenção aos alunos do C-PEM, e preciosas orientações.

Aos colegas de turma do C-PEM, pela ambiência fraterna. Foi uma honra conviver com excelentes profissionais.

Agradecimentos especiais são devidos, também, a todos os profissionais da EGN que apoiaram as diversas atividades curriculares do C-PEM.

Agradeço, também, à Capitão de Corveta (S) Elisângela de Oliveira Marin que, por sua experiência em atividades técnico-científicas, proporcionou importantes sugestões para o trabalho.

Agradeço, ainda, ao meu pai Oswaldo Fernando de Camargo Marin (*in memoriam*), pelo apoio e motivação inestimáveis.

"O Brasil é grande demais para sonharmos pequeno".

(Ozires Silva)

## RESUMO

A complexidade do cenário mundial contemporâneo, particularmente no que concerne às ameaças relatadas em conflitos recentes, amplifica a necessidade de cuidadosa reflexão acerca dos desafios para a Defesa Nacional. Dentre esses desafios, destaca-se a defasagem tecnológica do País em relação às nações mais avançadas, bem como a possibilidade de cerceamento tecnológico por parte dessas nações. A preocupação se acentua com as tendências científicas e tecnológicas apontadas nos estudos de futuro desses países, enquanto os cenários prospectivos do Ministério da Defesa brasileiro sinalizam a insuficiência de recursos orçamentários para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no País, mostrando, também, uma antevisão pouco favorável ao robustecimento da Base Industrial de Defesa. Objetivando proceder uma análise acerca da possibilidade de desenvolvimento, por meio de Indústria de Defesa brasileira, de tecnologia laser para Arma de Energia Direcionada, com vistas ao emprego em meios da Marinha do Brasil e com proveito para a sociedade, realizou-se um levantamento de literatura versando sobre o desenvolvimento tecnológico em análise, em especial os documentos disponíveis do Congresso dos Estados Unidos da América, tendo em vista o protagonismo dessa nação no referido desenvolvimento. Adicionalmente, procedeu-se a pesquisa por segmentos brasileiros, públicos ou privados, com infraestrutura ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de tecnologia laser, ou ambos, e com potencial para contribuir com alguma das fases do desenvolvimento tecnológico em apreço. Procedeu-se, também, uma análise sobre as possibilidades reais e futuras para o desenvolvimento tecnológico em discussão, além de consulta a uma profissional da Secretaria de Produtos de Defesa e a um professor e pesquisador de área relacionada à Fotônica, constatando-se que há, no País, pesquisa básica e aplicada envolvendo o uso do laser. No entanto, para que se atinja o nível de maturidade tecnológica capaz de promover indícios iniciais de viabilidade do desenvolvimento tecnológico aqui abordado, há necessidade de implantação de infraestrutura adequada. Depreendeu-se, portanto, que seria possível a elaboração de um programa nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de longo prazo, envolvendo governo, academia e indústria, para a produção autóctone de laser voltado para Arma de Energia Direcionada, com vistas ao emprego na Marinha e com benefícios para a sociedade, mediante adequados investimentos e apropriado planejamento governamental.

Palavras-chave: Arma de Energia Direcionada. Indústria de Defesa. Laser.

## ABSTRACT

The complexity of the modern world scenario, particularly the threats reported in recent conflicts, emphasizes the importance of careful reflection on the challenges for national defense. Among these challenges, the country's technological gap in relation to the most advanced nations stands out, as does the possibility of technological restriction by these nations. The concern is accentuated by the scientific and technological trends pointed out in the future studies of these countries, while the prospective scenarios of the Brazilian Ministry of Defense indicate the insufficiency of budgetary resources for research, development and innovation in the country, also showing an unfavorable forecast for the strengthening of the Defense Industrial Base. A survey of literature dealing with the technological development under analysis, particularly documents available from the Congress of the United States of America, was conducted in order to carry out an analysis about the possibility of developing, through the Brazilian Defense Industry, laser technology for Directed-Energy weapons with a view to employment in the Navy and with benefits for society. Additionally, research was carried out in Brazilian segments, public or private, with infrastructure or technical-scientific-professional capacity for the development of laser technology, or both, and with the potential to contribute to some of the phases of technological development in question. An analysis was also carried out on the real and future possibilities for the technological development under discussion, in addition to consultation with a professional from the Department of Defense Products and a professor and researcher in the area related to photonics, verifying that there is, in the country, basic and applied research involving the use of lasers. However, in order to reach the level of technological maturity expected for the initial signs of feasibility of the technological development discussed here, there is a need to implement an adequate infrastructure. It was inferred, therefore, that it would be possible to elaborate a long-term national program of Research and Development, involving the government, academia, and industry, for the autochthonous production of lasers aimed at Directed-Energy Weapons, with a view to employment in the Navy and with benefits for society, through adequate investments and appropriate government planning.

Keywords: Directed-Energy Weapon. Defense Industry. Laser.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Ilustração da presença militar estrangeira no Atlântico Sul e na África e de exportações de Defesa da China para a África entre 2005 e 2015.....	22
Figura 2	– Pirâmide ilustrando a relação entre BID e usuário.....	23
Figura 3	– Dodecágono tecnológico, ilustrando os doze aspectos tecnológicos citados por Oliveira <i>et al.</i> (2020).....	27
Figura 4	– Ilustração esquemática do espectro eletromagnético.....	118
Figura 5	– Ecossistemas considerados na metodologia empregada por Mascheroni <i>et al.</i> (2020) para o Mapeamento sobre Fotônica no Brasil.....	126
Figura 6	– Cadeia de produção da indústria de Fotônica.....	128
Quadro 1	– Órgãos governamentais associados à ABIMDE.....	73
Quadro 2	– OM identificadas como ambientes de pesquisas afins à Fotônica.....	81
Quadro 3	– Laboratórios do Sisfóton-MCTI e principais linhas de pesquisa.....	82
Quadro 4	– Programas do PPED no âmbito da MB.....	84
Quadro 5	– Alguns eventos associados à evolução do conceito de quantização da luz.	114
Quadro 6	– Algumas contribuições que antecederam o advento do laser.....	115
Quadro 7	– Segmentos de mercado e aplicações de Fotônica.....	120
Quadro 8	– Subsegmentos de Fotônica para o setor de Defesa e Segurança.....	121



## LISTA DE TABELAS

1	– Dez maiores empresas de Defesa no mundo em 2020.....	76
2	– Gastos militares de países selecionados (ano de referência 2021).....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	– Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIMDE	– Associação Brasileira das Indústrias de Materiais e de Defesa e Segurança
ABM	– <i>Anti-Ballistic Missile</i>
ADM	– Armas de Destruição em Massa
ADMV	– Armas de Destruição em Massa e seus Vetores
AED	– Arma de Energia Direcionada
AEN	– Ação Estratégica Naval
AFIS	– <i>Automated Fingerprint Identification Systems</i>
AFRL	– <i>Air Force Research Laboratory</i>
AMAZUL	– Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A.
AMRJ	– Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
ASAT	– <i>Anti-SATellite</i>
ASCM	– <i>Anti-Ship Cruise Missile</i>
Astros II	– <i>Artillery SaTuration ROcket System II</i>
ATGM	– <i>Anti-Tank Guided Missiles</i>
ATL	– <i>Advanced Tactical Laser</i>
ATP	– <i>Advanced Targeting Pod</i>
BA-4	– <i>Budget Activity 4</i>
BANI	– <i>Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible</i>
BID	– Base Industrial de Defesa
BIS	– <i>Bureau of Industry and Security</i>
BRICS	– Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
CBC	– Companhia Brasileira de Cartuchos
CCD	– <i>Charge Coupled Device</i>
CCL	– <i>Commerce Control List</i>
CCW	– <i>Convention on Certain Conventional Weapons</i>
CD	– <i>Compact Disc</i>
CELAP	– Centro de Lasers e Aplicações
CF	– Constituição Federal
CGEE	– Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CHIMERA	– <i>Counter-electronic High Power Microwave Extended Range Air base defense</i>
CIWS	– <i>Close-in Weapon System</i>
CMOS	– <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CN	– Congresso Nacional
CNEN	– Comissão Nacional de Energia Nuclear
COIL	– <i>Chemical Oxygeniodine Lasers</i>
COVID-19	– <i>COronaVirus Disease 2019</i>
CPqD	– Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
C-RAM	– <i>Counter-Rocket, Artillery, and Mortar</i>
CRS	– <i>Congressional Research Service</i>
CTA	– Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial
CT&I	– Ciência, Tecnologia e Inovação
C-UAS	– <i>Counter-Unmanned Aerial Systems</i>
CW	– <i>Continuous Wave</i>
DARPA	– <i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DE	– <i>Directed-Energy</i>
DEW	– <i>Directed-Energy Warfare</i>
DGDNTM	– Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha
DIA	– <i>Defense Intelligence Agency</i>
DoD	– <i>Department of Defense</i>
DVD	– <i>Digital Versatile Disc</i>
EAR	– <i>Export Administration Regulations</i>
EB	– Exército Brasileiro
EC	– Emenda Constitucional
ED	– Energia Direcionada
EED	– Empresa Estratégica de Defesa
EMA	– Estado-Maior da Armada
EMBRAPA	– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMGEPRON	– Empresa Gerencial de Projetos Navais
ENCTI	– Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação
EMRG	– <i>ElectroMagnetic Rail Gun</i>
EN	– Estratégia Naval
END	– Estratégia Nacional de Defesa

EUA	– Estados Unidos da América
FAB	– Força Aérea Brasileira
FAYS	– Fazenda da Aeronáutica de Pirassununga
FIAC	– <i>Fast Inshore Attack Craft</i>
FMTV	– <i>Family of Medium Tactical Vehicles</i>
FPD	– <i>Flat Panel Display</i>
FSO	– <i>Free Space Optics</i>
FYDP	– <i>Future Years Defense Program</i>
GE	– Guerra Eletrônica
GLGP	– <i>Gun-Launched Guided Projectile</i>
HEL	– <i>High-Energy Laser</i>
HELCAP	– <i>High Energy Laser Counter-ASCM Program</i>
HELIOS	– <i>High-Energy Laser with Integrated Optical-dazzler and Surveillance</i>
HELSI	– <i>High Energy Laser Scaling Initiative</i>
HELWS	– <i>High-Energy Laser Weapon System</i>
HPM	– <i>High-Power Microwave</i>
HVP	– <i>HyperVelocity Projectile</i>
IBFóton	– Iniciativa Brasileira de Fotônica
ICT	– Instituição de Ciência, Tecnologia e Inovação
ID	– Indústria de Defesa
IEAv	– Instituto de Estudos Avançados
IED	– Iniciativa Estratégica de Defesa
IFI	– Instituto de Fomento e Coordenação Industrial
IMBEL	– Indústria de Material Bélico do Brasil
IME	– Instituto Militar de Engenharia
INCT	– Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia
INFO	– Instituto Nacional de Fotônica
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEA	– Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPEN	– Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
ISR	– <i>Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
ITA	– Instituto Tecnológico de Aeronáutica

JCS	– <i>Joint Chiefs of Staff</i>
LabFot	– Laboratório de Fotônica
LabTel	– Laboratório de Telecomunicações
LANAF	– Laboratório Nacional de Agro-Fotônica
LANTIRN	– <i>Low Altitude Navigation and Targeting Infrared for Night</i>
Laser	– <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LaWS	– <i>Laser Weapon System</i>
LBDN	– Livro Branco de Defesa Nacional
LCD	– <i>Liquid Crystal Display</i>
LED	– <i>Light Emitting Diode</i>
LIDAR	– <i>Light Detection and Ranging</i>
LIF	– Laboratório de Integração Fotônica
LIFóton	– Laboratórios Integrados em Fotônica
LOft	– Laboratório de Óptica e Fotônica
LSMO	– Laboratório de Sensoriamento e Monitoração Óptica
LWSD	– <i>Laser Weapons System Demonstrator</i>
MARE	– Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética
Maser	– <i>Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
MB	– Marinha do Brasil
MCTI	– Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MD	– Ministério da Defesa
MDA	– <i>Missile Defense Agency</i>
MEMS	– <i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>
MLD	– <i>Maritime Laser Demonstration</i>
MRE	– Ministério das Relações Exteriores
NBQR	– Nuclear, Biológica, Química e Radiológica
Nd:YAG	– <i>Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet</i>
NLFoS	– <i>Navy Laser Family of Systems</i>
NUCLEP	– Nuclebrás Equipamentos Pesados S. A.
OBNAV	– Objetivo Naval
ODIN	– <i>Optical Dazzling Interdictor, Navy</i>
ODS	– Órgão de Direção Setorial
OECD	– <i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>

OLED	– <i>Organic Light Emitting Diode</i>
OM	– Organização Militar
O&S	– <i>Operation and Sustainment</i>
OSD	– <i>Office of the Secretary of Defense</i>
OTAN	– Organização do Tratado do Atlântico Norte
OUSDR(R&E)	– <i>Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering</i>
PAED	– Plano de Articulação e de Equipamento de Defesa
PD&I	– Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
P&D	– Pesquisa e Desenvolvimento
PED	– Produtos Estratégicos de Defesa
PEM	– Plano Estratégico da Marinha
PESD	– Planejamento Estratégico Setorial de Defesa
PIB	– Produto Interno Bruto
PHaSR	– <i>Personnel Halting and Stimulation Response</i>
PNBID	– Política Nacional da Base Industrial de Defesa
PND	– Política Nacional de Defesa
PNM	– Programa Nuclear da Marinha
PRODE	– Produto de Defesa
PRONAPA	– Programa de Desenvolvimento de Navios-Patrolha
PROSUB	– Programa de Desenvolvimento de Submarinos
RDT&E	– <i>Research, Development, Test, and Evaluation</i>
RHEL	– <i>Ruggedized High Energy Laser</i>
RMA	– <i>Revolution on Military Affairs</i>
SARS-CoV-2	– <i>Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2</i>
SAM	– <i>Surface-to-Air Missile</i>
SAW	– <i>Surface Acoustic Wave</i>
SBM	– <i>Strategic Ballistic Missile</i>
SCTMB	– Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil
SD	– Sistema de Defesa
SDI	– <i>Strategic Defense Initiative</i>
SEAD	– <i>Suppression of Enemy Air Defense</i>
SELOM	– Secretaria de Ensino, Logística, Mobilização, Ciência e Tecnologia do Ministério da Defesa
SENAI	– Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SEPROD	– Secretaria de Produtos de Defesa
SG	– Secretaria-Geral
SHIELD	– <i>Self-protect High-Energy Laser Demonstrator</i>
SHORAD	– <i>SHOrt-Range Air Defense</i>
SIPRI	– <i>Stockholm International Peace Research Institute</i>
Sisfóton	– Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica
SisGAAz	– Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul
SNCTI	– Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação
SNLWS	– <i>Surface Navy Laser Weapon System</i>
SOFLAM	– <i>Special Operation Forces LAser Marker</i>
SPTMB	– Sistema de Prospecção Tecnológica da Marinha
SSL	– <i>Solid State Laser</i>
SSL QRC	– <i>Solid State Laser Quick Reaction Capability</i>
SSL-TM	– <i>Solid State Laser Technology Maturation</i>
TAL	– <i>Technology Alert List</i>
T&E	– <i>Test and Evaluation</i>
THEL	– <i>Tactical High Energy Laser</i>
THOR	– <i>Tactical High-Power Microwave Operational Responder</i>
UAS	– <i>Unmanned Aerial Systems</i>
UAV	– <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UCAV	– <i>Unmanned Combat Aerial Vehicle</i>
UE	– União Europeia
UFES	– Universidade Federal do Espírito Santo
UFG	– Universidade Federal de Goiás
UFMS	– Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
UFPE	– Universidade Federal de Pernambuco
UNESCO	– <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UNESP	– Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
UNICAMP	– Universidade Estadual de Campinas
USAF	– <i>United States Air Force</i>
USN	– <i>United States Navy</i>

USP	– Universidade de São Paulo
USS	– <i>United States Ship</i>
URSS	– União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
VANT	– Veículo Aéreo Não Tripulado
VUCA	– <i>Volatility, Uncertainty, Complexity and Ambiguity</i>
WARDEN	– <i>Waveform Agile Radio-frequency Directed Energy</i>
WDM	– <i>Wavelength Division Multiplexing</i>
WMD	– <i>Weapon of Mass Destruction</i>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1	Questão norteadora.....	31
1.2	Objetivos.....	32
1.2.1	Objetivo geral.....	32
1.2.2	Objetivos específicos.....	32
1.3	Metodologia.....	32
1.4	Estrutura do trabalho.....	33
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>35</b>
2.1	Visão geral do emprego do laser em atividades militares.....	36
2.1.1	Início do emprego do laser como arma não letal.....	39
2.1.2	Início do emprego do laser em sistemas de defesa aérea e antimísseis....	41
2.2	Energia direcionada.....	43
2.2.1	Arma de energia direcionada e guerra de energia direcionada.....	43
2.2.2	Laser de alta energia.....	44
2.2.3	Alguns aspectos sobre o uso da energia direcionada.....	44
2.3	Visão geral sobre arma de energia direcionada nos EUA.....	47
2.3.1	Experiências da Marinha dos EUA com laser a bordo dos navios.....	47
2.3.2	Programas de arma de energia priorizados na Marinha dos EUA.....	49
2.3.3	Programas de arma de energia priorizados no Departamento de Defesa.	53
2.3.4	Programas de arma de energia priorizados na Força Aérea dos EUA.....	55
2.3.5	Programas de arma de energia priorizados no Exército dos EUA.....	56
2.4	Sinopse sobre energia direcionada nos EUA, Rússia, China e Israel.....	58
2.4.1	EUA.....	58
2.4.2	Rússia.....	59
2.4.3	China.....	60
2.4.4	Israel.....	62
2.5	Vantagens e limitações da arma a laser a bordo de navios de superfície..	63

2.5.1	Vantagens potenciais.....	64
2.5.2	Limitações potenciais.....	64
2.5.3	Custos potenciais e custo-efetividade comparados com outros sistemas.	66
2.6	Princípios éticos do uso de armas laser.....	68
<b>3</b>	<b>DESAFIOS BRASILEIROS NA ÁREA DE FOTÔNICA COM RELAÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE ARMA DE ENERGIA DIRECIONADA.....</b>	<b>70</b>
3.1	Visão geral da Base Industrial de Defesa Brasileira.....	71
3.1.1	Importância da Base Industrial de Defesa.....	71
3.1.2	Empresas de Defesa e Empresas Estratégicas de Defesa.....	72
3.1.3	Principais setores da Base Industrial de Defesa Brasileira.....	73
3.1.4	Mercado de Defesa no mundo.....	75
3.2	Visão geral da Fotônica no País.....	79
3.2.1	Laboratórios militares.....	80
3.2.2	Laboratórios integrantes do Sisfóton.....	82
3.3	Desafios à Indústria de Defesa Brasileira.....	83
<b>4</b>	<b>PERSPECTIVAS PARA A FOTÔNICA NO BRASIL QUANTO AO DESENVOLVIMENTO DE ARMA DE ENERGIA DIRECIONADA.....</b>	<b>86</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>94</b>
	<b>GLOSSÁRIO.....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE A – Princípios gerais do laser e uma visão geral da Fotônica.</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICE B – Levantamento junto à integrante da SEPROD.....</b>	<b>129</b>
	<b>APÊNDICE C – Levantamento junto ao integrante do Meio Acadêmico..</b>	<b>132</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O entendimento contemporâneo acerca do termo “dual”, no tocante a assuntos de Defesa, remonta ao século XX, e foi no início da Guerra Fria<sup>1</sup> que esse entendimento foi ganhando relevância, em meio aos temores acerca da proliferação das tecnologias relacionadas às armas nucleares. Nesse contexto, a expressão “uso dual”<sup>2</sup> denota o emprego de tecnologias com aplicações civis e militares, abarcando, também, a preocupação acerca das tecnologias com potencial para uso em fins nefastos como, por exemplo, as tecnologias que podem ser empregadas em ações terroristas ou armas de destruição em massa (PERANI, 1997, p. 1; ROSNER, 2016, p.1; WHITE *et al.*, 1996, p. II-1).

Com o fim da Guerra Fria, mostrou-se mais intensa a busca por estratégias orçamentárias voltadas para a viabilização do desenvolvimento de tecnologias de emprego dual com vistas ao fortalecimento da Base Industrial de Defesa (BID). A transição entre os séculos XX e XXI testemunhou a crescente demanda de itens de uso dual no setor de Defesa, em meio a profundas transformações tecnológicas, econômicas e sociais (PERANI, 1997, p. 1; ROSNER, 2016, p.1; STOWSKY, 1997, p. 1-6; WHITE *et al.*, 1996, p. II-1).

No contexto destas intensas transformações, surge, no final da Guerra Fria, o termo VUCA – acrônimo inglês para a expressão *Volatility, Uncertainty, Complexity and Ambiguity* – sugerindo a percepção de um mundo caracterizado por volatilidade, incerteza, complexidade e ambiguidade. Além do termo VUCA, o termo BANI – acrônimo inglês para *Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible* – também tem sido empregado para interpretar o mundo atual, descrevendo os tempos recentes como um mundo frágil, ansioso, não-linear e incompreensível (GRUCZA; TOMSZYS, 2022, p. 231; TAHVILI; HATVANI, 2022, p. 87).

Qualquer que seja a interpretação acerca do mundo contemporâneo, deve-se considerar, nos estudos voltados para Defesa, a expressiva influência do desenvolvimento tecnológico nas transformações sofridas pela humanidade. Nesse contexto, importa destacar, também, a coexistência dos benefícios gerados pelos avanços tecnológicos e as possibilidades de uso, intencional ou não, de tecnologias que resultem em efeitos nocivos.

---

1 Guerra Fria corresponde ao período da história de 1945 a 1991 que foi dominado pela rivalidade entre os Estados Unidos da América e a antiga União Soviética (MASON, 1996).

2 No presente trabalho, a expressão “uso dual” corresponde ao uso tanto civil quanto militar, em consonância com o conceito apresentado para a expressão “uso duplo” no inciso II, parágrafo 1º da Lei nº 9.112/1995 (BRASIL. CN, 1995).

A envoltória de benesses e malefícios advindos das inovações tecnológicas tornou-se expressiva na transição entre os séculos XX e XXI, evidenciando a complicada relação entre os avanços tecnológicos e as consequências para a humanidade. Dois eventos do presente século, marcados por tensões e reflexos a nível global, exemplificam a confusa conexão das inovações tecnológicas com a complexidade do mundo contemporâneo: a Pandemia de coronavírus, que propagou grande pânico a partir de 2020, gerando consequências que ainda se arrastam; e o conflito entre a Rússia e a Ucrânia, deflagrado em 2022.

O coronavírus causador da Síndrome Respiratória Aguda Grave 2 – em inglês, *Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2* (SARS-CoV-2) – foi identificado, pela primeira vez, em dezembro de 2019, sendo o agente responsável pela tão propalada Doença de Coronavírus 2019 – em inglês *COronaVirus Disease 2019* (COVID-19) – a qual foi declarada como uma ameaça à saúde global em março de 2020 (LANA *et al.*, 2020, p. 1).

A Pandemia de COVID-19, somada às medidas de bloqueio adotadas por diversos países, resultou em uma crise socioeconômica global sem precedentes. Intensos esforços no setor de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) desempenharam importante papel na resposta à Pandemia, sendo oportuno mencionar que, em muitos países, houve intensa participação das Forças Armadas (PAUNOV; PLANES-SATORRA, 2021, p. 8; KHORRAM-MANESH *et al.*, 2022).

Quanto ao conflito entre a Rússia e a Ucrânia, iniciado em 24 de fevereiro de 2022 com a invasão da Rússia ao território ucraniano (BOWEN, 2022, p. 3), os supostos benefícios da tecnologia de mísseis hipersônicos<sup>3</sup> serviram de alerta aos países da Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), os quais vêm demonstrando suas intenções de reverem suas políticas de Defesa e dissuasão (WRIGHT, 2022, p. 1).

Mudanças globais massivas, rápidas e abrangentes vêm permeando o século XXI, cumprindo destacar, também, os impactos nas relações de produção e consumo, notadamente os processos que se enquadram na chamada “Quarta Revolução Industrial”, expressão concebida em 2016 por Klaus Schwab, fundador e presidente-executivo do Fórum Econômico Mundial, com o intuito de explicar o novo período de revolução no setor industrial, marcado pelo

---

3 O voo hipersônico se refere a um fenômeno aerodinâmico pelo qual um objeto viaja a velocidades superiores a mach 5 dentro da atmosfera da Terra (WRIGHT, 2022, p. 2). O número mach de um objeto em voo corresponde à razão entre a velocidade real do objeto – ou seja, a velocidade do objeto em relação ao ar circundante – e a velocidade do som, sendo, portanto, um parâmetro adimensional (SADRAEY, 2017, p. 25).

surgimento de novos modelos de negócios e reformulação dos sistemas de produção, consumo, transporte e entrega (SHWAB, 2016, p. 7).

Essas profundas mudanças reverberam nos ambientes de conflitos armados, provocando transformações na natureza do combate e, até mesmo, nos combatentes (AZAM, 2019, p. 1). O ritmo da modernização militar e o surgimento de capacidades decorrentes de inovação tecnológica vêm impactando, significativamente, o caráter da guerra e a forma como as operações militares são conduzidas (BILLING *et al.*, 2021, p. 947).

Tecnologias emergentes, especialmente na área de Física de Altas Energias, Ciência dos Materiais, Biotecnologia, Tecnologia de Sensores, Computação e Eletrônica de Comunicação, têm atuado como propulsores para o desenvolvimento de novos sistemas de armas (MALLICK, 2020, p. 4). Entretanto, poucas nações possuem conhecimento e infraestrutura necessários ao desenvolvimento de tais tecnologias.

O acesso ao conhecimento avançado em tecnologia de ponta constitui uma fonte de poder nas relações entre os países (OLIVEIRA; SOUZA, 2018, p. 356), e o cerceamento tecnológico praticado por nações desenvolvidas, que buscam preservar as exportações de seus produtos de Defesa, impõe dificuldades ao crescimento da Indústria de Defesa (ID) de países em desenvolvimento, como o Brasil (GENTILE, 2015, p. 16), que enfrenta um hiato tecnológico em relação aos países mais avançados.

Em relação à defasagem tecnológica e seu impacto na Defesa Nacional, cumpre destacar que o Ministério da Defesa (MD) publicou o documento “Cenário de Defesa 2020 – 2039” (BRASIL. MD, 2017) mencionando que, não obstante o nível de desenvolvimento tecnológico nacional já alcançado e as melhorias que poderão resultar dos projetos tecnológicos em execução, não há perspectiva de redução da diferença tecnológica em relação aos países mais desenvolvidos, em função do volume de investimentos necessários, e as tecnologias nacionais, possivelmente, não atenderão às necessidades militares (BRASIL. MD, 2017, p. 39).

Dentre os aspectos abordados pelo documento do MD, é oportuno destacar o incremento dos conflitos assimétricos e híbridos, a dependência tecnológica, a escassez mundial de recursos naturais, o terrorismo, o crime organizado transnacional e a crescente presença militar estrangeira no Atlântico Sul (BRASIL. MD, 2017, p. 51-52). Considerando a importância estratégica do Atlântico Sul para o Brasil, cuidadosa avaliação deve ser feita ante a presença militar de outros países nessa região (tropas, meios e bases), bem como ante as inferências acerca de instalações da China na costa oeste africana (BRASIL. MD, 2017, p. 32).

A presença militar estrangeira no Atlântico Sul e na África, bem como as exportações de Defesa da China para a África – entregas observadas no período de 2005 a 2015 – são ilustradas na FIG. 1 (BRASIL. MD, 2017, p. 32; IISS, 2016, p. 21).

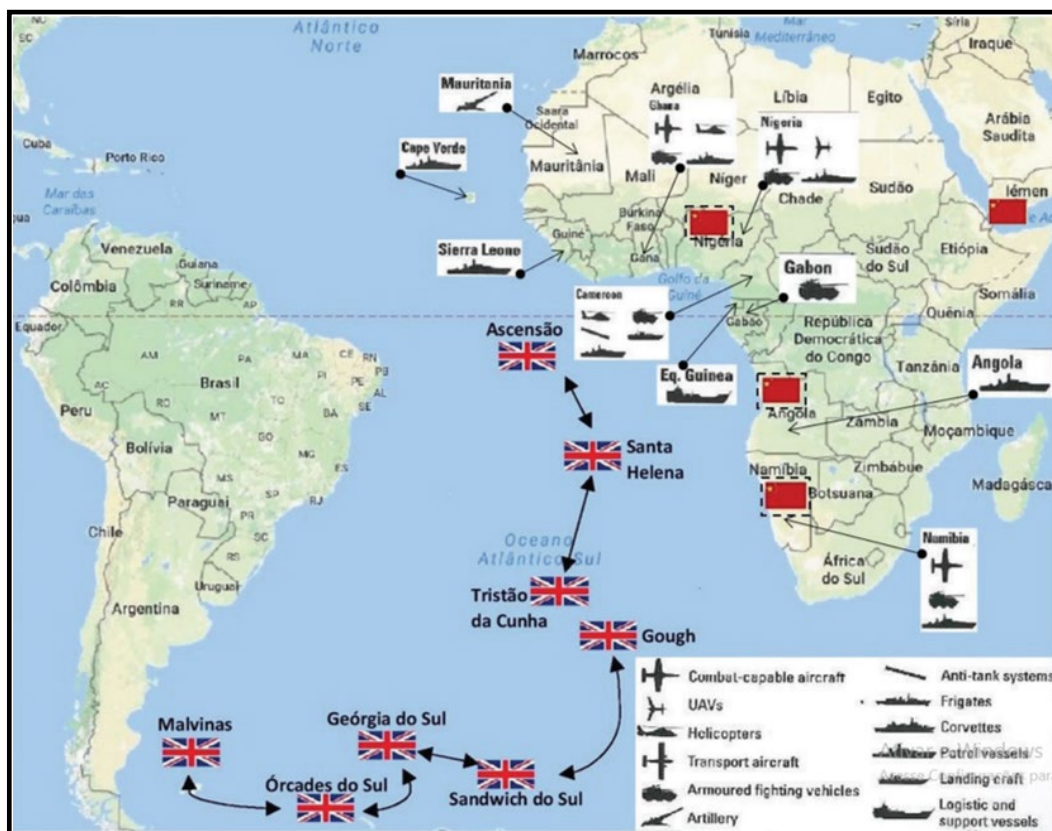


FIGURA 1 - Ilustração da presença militar estrangeira no Atlântico Sul e na África e de exportações de Defesa da China para a África entre 2005 e 2015.  
Fonte: BRASIL. MD, 2017, p. 32; IISS, 2016, p. 21.

De acordo com o “Cenário de Defesa 2020-2039”, as relações econômicas, políticas e militares entre os grandes compradores e fornecedores de sistemas de Defesa, o atraso tecnológico e as demandas atuais das Forças Armadas não alterarão o andamento das capacidades atuais da indústria brasileira. As vendas deverão permanecer dependentes de fornecedores estrangeiros de componentes (BRASIL. MD, 2017, p. 36). O documento elaborado pela Defesa apresenta, também, uma antevisão pouco favorável ao robustecimento da BID brasileira, importante elemento para o desenvolvimento do País e para a capacitação nacional, com vistas ao enfrentamento de ameaças que possam surgir no futuro.

Quanto à BID brasileira, configuram-se cinco pilares: o científico, o tecnológico, o infraestrutural, o industrial e o logístico. A ID é o elemento fundamental da BID, devendo-se

destacar que a atuação solitária de uma ID não lhe imprime os requisitos necessários para o atendimento das expectativas de aprovisionamento de produtos e serviços militares. Um aspecto fundamental para a obtenção dessa capacitação plena é a existência de uma infraestrutura de CT&I adequadamente instituída (AMARANTE, 2012, p. 11). A relação entre a BID e o usuário, ressaltando a importância da CT&I no processo que resulta na entrega de produtos e serviços para a Defesa, é ilustrada na FIG. 2 (AMARANTE, 2012, p. 12).

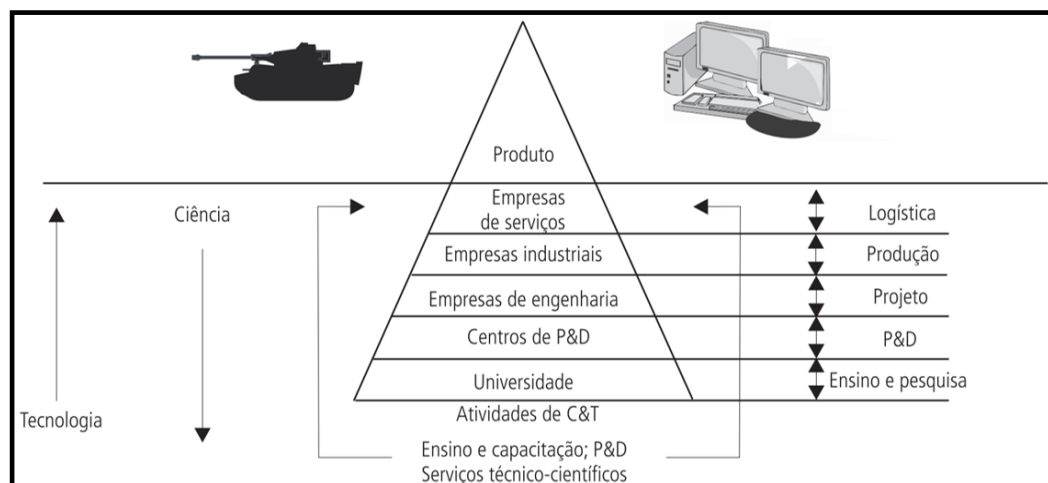


FIGURA 2 - Pirâmide ilustrando a relação entre BID e usuário. Quanto mais próximo da base está o elemento da BID, maior o conteúdo científico de suas atividades. Quanto mais próximo do usuário, maior o conteúdo tecnológico.

Fonte: AMARANTE, 2012, p. 12.

A formulação inicial da abordagem do presente trabalho considerou, de um lado, as tendências apresentadas no documento “Cenário de Defesa 2020-2039”, a importância da BID e a relevância da CT&I, e de outro, o tema escolhido, isto é, os desafios e as oportunidades para a Marinha do Brasil (MB), quanto ao desenvolvimento de tecnologias de caráter dual por ID brasileira. Adicionalmente, foram levados em conta os seguintes aspectos:

- a) a necessidade de alinhamento com os documentos de alto nível da Defesa;
- b) as aspirações para o futuro da Marinha, expressas nos documentos da MB;
- c) as perspectivas observadas em alguns estudos de futuro de outros países, no tocante às tecnologias para aplicações militares; e
- d) as dificuldades vislumbradas para a CT&I no Brasil e para a BID Nacional.

Com a finalidade de balizar a delimitação do assunto do presente trabalho, a partir dos quatro aspectos considerados na formulação inicial da abordagem, são apresentados, a

seguir, comentários adicionais e informações que fortalecem o delineamento da ideia central e a argumentação atinente, iniciando com comentários acerca da necessidade de alinhamento com os documentos de alto nível da Defesa.

As atividades de CT&I, no âmbito da Marinha, são orientadas por normas harmônicas com os documentos condicionantes de alto nível do MD e, por consequência, com os textos legais versando sobre CT&I no Brasil. Dando-se ainda destaque a esse alinhamento, é oportuno tecer alguns comentários acerca dos fundamentos legais da Política de CT&I de Defesa, aprovada pela Portaria nº 3.063/2021 do MD (BRASIL. MD, 2021).

No Brasil, as atividades de CT&I são regidas por um arcabouço normativo robusto, que inicia na Carta Magna e se propaga nos textos legais que dispõem sobre CT&I e na Estratégia Nacional de CT&I (ENCTI). Importa ressaltar que esse arcabouço normativo evidencia a importância da CT&I para o crescimento do País.

Dentro desse contexto, destaca-se que a Emenda Constitucional (EC) nº 85, estabelecida pelo Congresso Nacional (CN) em 26 de fevereiro de 2015, alterou o texto constitucional e adicionou, à Constituição Federal (CF), dispositivos voltados para as atividades de CT&I (BRASIL. CN, 2015). Com a EC nº 85, o texto da CF passou a conter o termo “inovação” e a dispor sobre o Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (SNCTI), conforme consta no art. 219-B adicionado à Constituição (BRASIL, 1988) pela EC nº 85 (BRASIL. CN, 2015).

A nível ministerial, destaca-se que a ENCTI é a publicação do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) que orienta o SNCTI na busca de soluções para desafios de natureza social, ambiental e econômica (BRASIL. MCTI, 2018b, p. 9). A ENCTI, referente ao período 2016-2022, apresenta onze temas em CT&I considerados como estratégicos para o progresso e a soberania da Nação, dentre os quais se destaca o tema “Aeroespacial e Defesa”. No objetivo atribuído a esse tema, consta o estímulo à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) voltada para produtos de aplicação dual – civil e militar (BRASIL. MCTI, 2018b, p. 14).

Ainda a nível ministerial, no âmbito da Defesa, as atividades de CT&I são norteadas pelas diretrizes estabelecidas na Política Nacional de Defesa (PND), na Estratégia Nacional de Defesa (END) e no Livro Branco de Defesa Nacional (LBDN), em harmonia com a Carta Magna, com os textos legais infraconstitucionais versando sobre CT&I e com a ENCTI.

Além do estímulo à autonomia tecnológica do Brasil e ao desenvolvimento de produtos de uso civil e militar, a PND, a END e o LBDN preconizam o incentivo ao fortalecimento da BID, como está expresso, por exemplo, em um dos pressupostos da PND, documento



condicionante de mais alto nível para as ações destinadas à Defesa Nacional (BRASIL. MD, 2020, pág. 21).

No âmbito da MB, essas diretrizes são propagadas a partir da publicação do Estado-Maior da Armada (EMA) intitulada “Política Naval” (EMA-323), que estabelece os Objetivos Navais (OBNAV), os quais correspondem aos objetivos de mais alto nível da Marinha. Nesse sentido, os OBNAV orientam o planejamento estratégico da Força com vistas a alcançar a sua Visão de Futuro (BRASIL. EMA, 2019, p. 26).

Assim, a consecução dos OBNAV é propagada a partir do “Plano Estratégico da Marinha” (PEM), que estabelece, para cada OBNAV, as correspondentes Estratégias Navais (EN) e as Ações Estratégicas Navais (AEN). Cumpre destacar, como principal norteador das atividades de CT&I da MB, o OBNAV 6 – Modernizar a Força Naval – e suas respectivas EN: a EN 6.1 – Programa Nuclear da Marinha (PNM); a EN 6.2 – Construção do Núcleo do Poder Naval; e a EN 6.3 – Poder Naval do Futuro (BRASIL. EMA, 2020, p. 68).

Desse modo, as normas da MB que orientam as atividades de CT&I da MB estão alinhadas à Política Naval (EMA-323) e ao PEM (EMA-300). Dentre as normas da MB, destacam-se a “Doutrina de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha” (EMA-413), a “Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil” (EMA-415) e as normas da Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM) voltadas para CT&I (BRASIL. EMA, 2021a, p. 1-3; BRASIL. EMA, 2021b, p. 1-1).

Dentre as normas da MB, a Doutrina de CT&I da Marinha (EMA-413) estabelece os princípios fundamentais para o Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil (SCTMB), o qual é organizado em rede, tendo o EMA como Órgão de Direção-Geral, e a DGDNTM, como Órgão Central Executivo. Assim, a DGDNTM é o Órgão de Direção Setorial (ODS) da Marinha responsável pelos assuntos afetos à CT&I (BRASIL. EMA, 2021a, p. 3-8).

As atividades de CT&I da MB são caracterizadas levando-se em conta os seguintes aspectos: a área de domínio do conhecimento, ou seja, a área temática de interesse da MB; o nível de prontidão tecnológica, isto é, o estágio de maturidade da tecnologia envolvida; e a abrangência temporal, que pode estar correlacionada à Marinha do Presente, à Marinha do Amanhã ou à Marinha do Futuro (BRASIL. EMA, 2021, p. 2-6).

A Marinha do Presente corresponde à Marinha que opera e mantém os meios e sistemas, a Marinha do Amanhã se refere à Marinha que está sendo construída, e a Marinha do Futuro corresponde àquela “que reúne estudo, pesquisa, desenvolvimento, análise da

conjuntura em nível estratégico, prospecção tecnológica e primeiros passos para a concepção de futuros meios, sistemas e ‘sistemas de sistemas’ [...]” (BRASIL. EMA, 2021, p. 2-7).

No contexto do que é desejado para a Marinha do Futuro, destaca-se o papel do Sistema de Prospecção Tecnológica da Marinha (SPTMB), subsistema do SCTMB que tem por objetivo acompanhar as investigações científicas e desenvolvimentos tecnológicos, e reconhecer as tendências tecnológicas almejadas para a MB (BRASIL. DGDNTM, 2018, p. 1-2).

Luna e Almeida (2016), ao abordarem o SPTMB, mencionam, como fator importante para a execução apropriada do SPTMB, que os elementos responsáveis por gerar informações considerem, como fontes de dados, congressos e eventos similares de CT&I, feiras de produtos de Defesa, visitas a Instituições de Ciência, Tecnologia e Inovação (ICT), visitas a Organizações Militares (OM) operativas, consultas a publicações de teor técnico-científico e recursos da *internet*, dentre outras fontes (LUNA; ALMEIDA, 2016, p. 123).

Ademais, fazendo menção à Marinha do Futuro, Oliveira *et al.* (2020) analisaram publicações de outras nações e instituições internacionais versando sobre o futuro dos conflitos. O trabalho desses autores evidencia a preocupação de países desenvolvidos quanto ao emprego de tecnologias para o enfrentamento de possíveis ameaças no futuro.

Oliveira *et al.* (2020) ainda ressaltam a velocidade de resposta às ameaças como um elemento crítico dos conflitos, destacando, também, as velocidades de ataque extremamente elevadas, para as quais mencionam algumas tecnologias, como a tecnologia baseada na amplificação de luz por emissão estimulada de radiação – em inglês, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – Laser<sup>4</sup> (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 103).

O trabalho de Oliveira *et al.* (2020) também sumariza, a partir dos documentos internacionais analisados, doze aspectos tecnológicos críticos, dentre os quais se destaca, no escopo do presente trabalho, o aspecto “Energia”, abrangendo o desenvolvimento de lasers de alta potência, dentre outros avanços tecnológicos (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 107-108).

Os doze aspectos tecnológicos críticos são ilustrados pela FIG. 3, extraída de Oliveira *et al.* (2020), constituindo o que esses autores denominaram “dodecágono tecnológico”, com o alerta quanto à natureza dinâmica, em razão das rápidas evoluções tecnológicas, exigindo acompanhamento e atualização periódicos (OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 107-108).

---

4 O termo laser é um dos acrônimos estrangeiros integrados como palavras na língua portuguesa, correspondendo a substantivo masculino e escrito em letra minúscula (TIMBANE, 2014, p. 58).



FIGURA 3 - Dodecágono tecnológico, ilustrando os doze aspectos tecnológicos citados por Oliveira *et al.* (2020).

Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2020, p. 108.

O “dodecágono tecnológico” da FIG. 3 remete ao entendimento apresentado por Schwab (2016, p.7) ao abordar a Quarta Revolução Industrial, caracterizada pela confluência dos avanços tecnológicos e pela fusão de tecnologias nos mundos biológico, digital e físico. Nesse contexto, ressalta-se a tecnologia laser como importante ferramenta em diversos processos de produção, presente em avanços tecnológicos significativos no setor industrial.

De fato, a tecnologia laser apresenta inúmeras aplicações, tanto civis quanto militares, com progressos notáveis nas últimas duas décadas, e vem sendo empregada, amplamente, em diversos domínios como holografia, ciências espaciais, espectroscopia, ciências médicas, engenharia industrial, dentre outros domínios (AHMED *et al.*, 2021, p. 583).

No tocante ao uso militar do laser, podem ser citados, como exemplos de emprego, a designação de alvos, a medição de distância e o emprego em comunicações, dentre outros (MAINI, 2018, p. 885). Destaca-se, com base no aspecto “Energia” abordado por Oliveira *et al.* (2020, p. 108), o advento da arma a Laser de Alta Energia – em inglês, *High-Energy Laser* (HEL) – um dos tipos de Arma de Energia Direcionada (AED)<sup>5</sup>, cujo desenvolvimento tem amadurecido rapidamente nos últimos anos (OBERING III, 2019, p. 37; WATERMAN, 2019).

No escopo do presente trabalho, importa verificar a possibilidade de emprego de arma de HEL no âmbito de uma Força Naval. A arma de HEL vem se configurando como uma

5 O conceito de AED consta na publicação do MD intitulada “Glossário das Forças Armadas” – MD35-G-01 (BRASIL. MD, 2015, p. 37) – e será comentado na seção 2.2.1.

alternativa para “defesa de ponto”<sup>6</sup> em navios da Marinha dos Estados Unidos da América (EUA), contra ameaças atuais e alvos mais velozes como, por exemplo, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) – em inglês *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). A Marinha dos EUA – em inglês, *United States Navy* (USN) – vem obtendo, cada vez mais, êxito com arma de HEL em plataformas e exercícios de treinamento, colocando os EUA na vanguarda desse desenvolvimento (ANGELL, 2012, p. 118; O'ROURKE, 2021, p. 1; VERGUN, 2017).

O incentivo à BID, ao desenvolvimento de tecnologias de emprego dual e à independência tecnológica, propagado no arcabouço normativo das atividades de CT&I, suscita reflexões sobre possíveis processos nacionais de desenvolvimento tecnológico que contribuam com a redução do hiato tecnológico em relação aos países na vanguarda.

Levando-se em conta os aspectos anteriormente comentados, em especial, o caráter dual da tecnologia laser, os estudos de futuro de outros países e o nível atual de desenvolvimento de arma de HEL, seria desejável que houvesse algum programa nacional de P&D que contemplasse a aplicação da tecnologia laser com vistas ao desenvolvimento de AED.

No que se refere aos desafios que podem ser pensados para tal desenvolvimento, importa destacar a questão afeta aos insumos necessários para o processo, principalmente quanto à necessidade de importação, tendo em vista que muitos países controlam a exportação de itens de uso dual – civil e militar – abarcando, assim, um rol significativo de materiais, componentes e equipamentos associados à tecnologia laser.

O Brasil faz parte de diversos tratados que implicam reflexos diretos na Defesa. Em consonância com os referidos tratados, o País realiza o controle de exportação de bens de uso dual. Destaca-se, do arcabouço normativo brasileiro, a Lei nº 9.112/1995, que dispõe sobre a exportação de bens sensíveis e serviços diretamente vinculados (BRASIL. CN, 1995).

A Lei nº 9.112/1995 utiliza a expressão “uso duplo” para definir bens de “uso dual”, ou seja, bens que podem ser empregados para fins bélicos, ainda que tenham sido desenvolvidos para aplicações civis. A referida lei classifica, como “bens sensíveis”, aqueles de uso na área nuclear, química, biológica, incluindo os bens de uso dual (BRASIL. CN, 1995).

Mais especificamente sobre o laser, destaca-se o Decreto nº 3.437/2000, que estabelece o Protocolo IV sobre “Armas Cegantes a Laser”, adicional à Convenção sobre Proibições ou Restrições ao Emprego de Certas Armas Convencionais que podem ser Consideradas

---

6 De acordo com a MD35-G-01, “defesa de ponto” corresponde à “ação tática ou estratégica de Defesa baseada na proteção de determinada posição geográfica, navio ou ponto sensível” (BRASIL. MD, 2015, p. 85).

Excessivamente Lesivas ou Geradoras de Efeitos Indiscriminados<sup>7</sup> (BRASIL. PR, 2000). O Protocolo IV, em seu Artigo 1, prevê a proibição de uso de armas cegantes a laser:

Fica proibido o emprego de armas a laser especificamente concebidas, como única ou uma de suas funções de combate, para causar cegueira permanente à vista não ampliada, isto é, a olho nu ou a olhos providos de dispositivos corretores da vista. As Altas Partes Contratantes não deverão transferir armas dessa natureza a nenhum Estado ou entidade não-estatal (BRASIL. PR, 2000, p. 18).

Pela necessidade de aperfeiçoamento das diretrizes sobre bens sensíveis e serviços a eles associados, outros instrumentos normativos surgiram, sendo oportuno destacar, no escopo do presente trabalho, a Portaria nº 1.405/2014 do MCTI, que trata das listas de controle de exportação de bens relacionados a equipamento, material e tecnologia nuclear, bem como equipamento e material de uso dual e tecnologia com aplicação na área nuclear. A referida Portaria menciona os tipos de sistemas, equipamentos e componentes associados ao laser que estão sujeitos à análise e controle do governo (BRASIL. MCTI, 2014).

Como exemplos de outros países, podem ser citadas as regras de exportação dos EUA e da União Europeia (UE). A UE possui regras para controle da exportação, do trânsito, da corretagem, da assistência técnica e da transferência de itens de uso dual (EC, 2022). O Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho da UE de nº 2021/821 (EU, 2021) estabelece diretrizes para o controle de itens de uso dual, fazendo menção à tecnologia laser, em especial, no anexo I (Parte VIII – Categoria 6 – Sensores e Lasers).

O governo dos EUA, por meio da Agência de Indústria e Segurança – em inglês, *Bureau of Industry and Security* (BIS) – do Departamento de Comércio, por meio dos Regulamentos de Administração de Exportação – em inglês, *Export Administration Regulations* (EAR) – controla a exportação de inúmeros produtos, *software* e tecnologia, dentre eles, os itens de uso dual. Os itens controlados constam na Lista de Controle de Comércio – em inglês, *Commerce Control List* (CCL) – que compõe os EAR. Quanto aos itens relacionados ao laser, estes aparecem na Categoria 6 – Sensores e Lasers – da CCL (BIS, 2022).

Os controles de exportação de itens de uso dual, por parte de países tecnologicamente avançados, compõem o fenômeno do cerceamento tecnológico vivenciado por países

---

7 Essa convenção foi estabelecida pelo Decreto nº 2.739/1998 (BRASIL. PR, 1998), sendo conhecida como Convenção sobre Certas Armas Convencionais – em inglês, *Convention on Certain Conventional Weapons* (CCW) – adotada em Genebra, em 10 de outubro de 1980.

em desenvolvimento, podendo ocorrer de modo explícito ou velado (LONGO, 2007, p. 124). Importa discorrer um pouco mais sobre essa questão.

Rosental (2008), ao avaliar a importância das tecnologias sensíveis para classificação dos países quanto ao nível de desenvolvimento, destaca que os países desenvolvidos não compartilham conhecimento, o que acentua a desigualdade tecnológica entre estes e os demais países, cabendo, aos países menos desenvolvidos, concentrar esforços em busca da autonomia tecnológica (ROSENTAL, 2008, p. 153).

Barreto (2013), ao analisar a relevância da atividade de inteligência nos esforços de não proliferação de Armas de Destruição em Massa (ADM) e seus Vetores (ADMV), destaca que o Brasil faz parte de diversos tratados sobre não proliferação de ADMV, nas áreas química, nuclear, biológica e missilística, ressaltando, também, o cerceamento tecnológico por parte dos países que possuem tecnologias sensíveis e capacidade de produzir ADMV.

Ainda segundo Barreto (2013, p. 37), países que possuem tecnologias sensíveis tentam obstar o acesso a tais tecnologias, seja para impedir o emprego bélico, seja para resguardar a primazia tecnológica e as consequentes vantagens econômicas.

Não obstante as dificuldades comentadas até aqui, um contraponto que foi pensado, na abordagem do presente trabalho, corresponde à iniciativa nacional de apoio à inovação na área de Fotônica, principal área de conhecimento associada à tecnologia laser. Nesse sentido, o MCTI considera a Fotônica um campo estratégico para o progresso econômico e social e para a influência competitiva em setores considerados importantes para o mundo contemporâneo, em especial saúde, manufatura, comunicação e Defesa (MCTI, 2022).

Em 2021, o MCTI publicou duas portarias para incentivar o desenvolvimento da área de Fotônica: a Portaria nº 4.532/2021 (BRASIL. MCTI, 2021b), que trata da Iniciativa Brasileira de Fotônica (IBFóton), e a Portaria nº 4.530/2021 (BRASIL. MCTI, 2021a), que trata do Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica (Sisfóton-MCTI).

O artigo 1º da Portaria do MCTI nº 4.532/2021, que institui a IBFóton, menciona essa iniciativa como o “principal programa estratégico para incentivo da Fotônica no País, com vistas a criar, integrar e fortalecer as ações governamentais na área, com foco na promoção da inovação na indústria brasileira e no desenvolvimento científico, tecnológico, econômico e social” (BRASIL. MCTI, 2021b). Por outro lado, o artigo 1º da Portaria do MCTI nº 4.530/2021, que institui o Sisfóton-MCTI, cita esse sistema como o instrumento governamental na área de Fotônica, com o mesmo foco da IBFóton (BRASIL. MCTI, 2021a).

A fim de delimitar o assunto do presente trabalho, com base nos aspectos considerados na formulação inicial da abordagem e demais fatores comentados até o momento, estabeleceu-se, então, uma correlação de ideias, tendo, como ideia central, o emprego da tecnologia laser. De um lado, destacaram-se os seguintes aspectos: as previsões apontadas no “Cenário de Defesa 2020-2039”; as perspectivas tecnológicas delineadas por outros países quanto à guerra do futuro; o estado atual de desenvolvimento de arma de HEL; a questão do cerceamento tecnológico; e a necessidade de Defesa do entorno estratégico brasileiro. De outro, foram levados em conta: o estímulo à autonomia tecnológica do Brasil e ao desenvolvimento de produtos de uso civil e militar; o caráter dual da tecnologia laser, com inúmeras aplicações no ambiente civil; e a iniciativa nacional de apoio à inovação na área de Fotônica.

Diante dessa correlação, inferiu-se, como relevante, uma análise acerca da possibilidade de desenvolvimento, pela ID brasileira, de tecnologia laser para AED, com vistas a equipar algum dos meios da MB – Navais, Aeronavais ou de Fuzileiros Navais – e com benefícios para a sociedade brasileira. Foi considerado, para a hipótese de viabilidade do desenvolvimento inferido, que o processo de P&D atinente poderá promover o fortalecimento da capacidade de pesquisa, com reflexos positivos na ID Nacional. A análise sugerida visa obter informações que possam contribuir com os objetivos estratégicos de CT&I da MB. Por conseguinte, foi elaborada a questão norteadora que será apresentada a seguir.

### 1.1 QUESTÃO NORTEADORA

Tendo em vista os objetivos estratégicos de CT&I da MB, harmônicos com a busca do fortalecimento da BID brasileira e da autonomia tecnológica do País (BRASIL. EMA, 2021a, p. 3-3), e os aspectos mencionados até o momento, formula-se a seguinte questão: “é possível desenvolver, por meio da ID brasileira, tecnologia laser para AED, com vistas ao emprego em meios da MB e com proveito para a sociedade?”. Com a finalidade de responder a essa questão, foram elaborados os objetivos que serão apresentados a seguir.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho possui o seguinte objetivo geral: “analisar os aspectos afetos à possibilidade de desenvolvimento, pela Indústria de Defesa brasileira, de tecnologia laser para AED, com vistas ao emprego em meios da MB e com proveito para a sociedade”.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) elaborar um levantamento de literatura versando sobre desenvolvimento de laser para AED e seu estado da arte, em especial os documentos disponíveis do Congresso dos EUA, tendo em vista o protagonismo dos EUA nesse assunto;
- b) identificar a existência – e desafios – de segmentos brasileiros, públicos ou privados, que possuam infraestrutura ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de tecnologia laser, ou ambos, e que possam contribuir com alguma das fases do desenvolvimento de tecnologia laser para AED;
- c) analisar as possibilidades reais e futuras para o desenvolvimento de tecnologia laser para AED pela Indústria de Defesa brasileira, com vistas ao emprego dessa tecnologia na MB e com potencial de proveito para a sociedade.

## 1.3 METODOLOGIA

Para consecução dos objetivos da presente tese, foi realizada pesquisa bibliográfica com foco na literatura sobre o assunto – incluindo trabalhos publicados, livros, legislações, sites e bancos de dados disponíveis na *internet* – e pesquisa analítica. Tendo em vista o caráter embrionário da abordagem proposta, bem como a escassez de literatura versando sobre desenvolvimento de AED no Brasil, considerou-se a realização de consulta a dois profissionais cujas atividades guardam, de alguma forma, relação com o assunto do presente trabalho.

Desse modo, foram obtidas visões pessoais de profissionais pertencentes a dois setores importantes: o setor da Defesa – consulta a uma profissional da Secretaria de Produtos de Defesa (SEPROD), subordinada à Secretaria-Geral (SG) do MD; e o Meio Acadêmico –



consulta a um docente da Escola Naval que também é pesquisador do Instituto Militar de Engenharia (IME) em área afim ao tema Fotônica. Os profissionais consultados foram os seguintes:

- a) Dra. FERNANDA DAS GRAÇAS CORRÊA (integrante da SEPROD);
- b) Prof. Dr. JESSE WERNER COSTA (docente da Escola Naval e pesquisador do IME).

É oportuno mencionar o art. 43 do Decreto nº 10.998/2022 (BRASIL. PR, 2022a), que elenca as competências da SEPROD:

[...] II - propor os fundamentos para formulação e atualização da Política Nacional da **Indústria de Defesa** e acompanhar sua execução [...] IV - propor a formulação e a atualização da Política Nacional de **Exportação e Importação de Produtos de Defesa**, elaborar normas e supervisionar as ações inerentes ao controle das importações e das exportações de produtos de Defesa [...] VI - propor a formulação e a atualização de diretrizes relacionadas a processos de investimentos, financiamentos, garantias, concessões, parcerias público-privadas e reestruturação de **empresas de Defesa e empresas estratégicas de Defesa**, observadas as políticas públicas dirigidas à **Base Industrial de Defesa** [...] VIII - apresentar diagnósticos para subsidiar investimentos públicos e privados na **Base Industrial de Defesa** [...] X - propor e acompanhar as atividades relacionadas ao desenvolvimento científico e tecnológico, em áreas de interesse da Defesa, incluídas a tecnologia industrial básica e as **tecnologias sensíveis** [...] (BRASIL. PR, 2022a, p. 9, grifo nosso).

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A introdução descreve a motivação do trabalho, a questão norteadora, os objetivos e a metodologia, com abordagens consideradas relevantes sobre o assunto escolhido para a tese. No capítulo 2, são apresentados os principais aspectos levantados na literatura, em especial os obtidos em documentos disponíveis do Congresso dos EUA, bem como outros documentos de órgãos governamentais estadunidenses. Os documentos analisados, juntamente com os mencionados nos demais capítulos, constam na listagem bibliográfica.

No capítulo 3, são descritos comentários acerca da existência – e desafios – de segmentos brasileiros, públicos ou privados, com infraestrutura ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de tecnologia laser, ou ambos, e que poderiam contribuir com alguma das fases do desenvolvimento de tecnologia laser para AED, objetivando participação de ID brasileira, com vistas ao emprego desse tipo de AED em meios da MB e com

proveito do conhecimento obtido para a sociedade. Informações complementares ao capítulo 3 podem ser encontradas no APÊNDICE A – Princípios gerais do laser e uma visão geral da Fotônica.

No capítulo 4, com base nas informações obtidas na literatura consultada e nas percepções dos dois profissionais consultados, são apresentados comentários sobre a possibilidades reais e futuras para o desenvolvimento, por ID brasileira, de laser para AED com vistas ao emprego na MB e com potencial de proveito para a sociedade. No capítulo 5, são apresentadas as considerações finais.

Há, ainda, um Glossário, que lista os principais conceitos afetos a alguns termos e abreviaturas utilizados na tese. Além do APÊNDICE A, há mais dois apêndices, correspondentes às respostas obtidas junto aos dois profissionais consultados: a profissional da SEPROD, Dra. Fernanda das Graças Corrêa (APÊNDICE B); e o pesquisador do Meio Acadêmico de área afim à Fotônica – docente da Escola Naval e pesquisador do IME – Prof. Dr. Jesse Werner Costa (APÊNDICE C).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

No presente capítulo, serão apresentadas informações sobre o desenvolvimento de laser para AED obtidas, principalmente, a partir de documentos disponíveis do Congresso dos EUA. Boa parte da revisão de literatura aborda a experiência dos EUA, país apontado, pelos documentos disponíveis, como protagonista no desenvolvimento de laser para AED.

Nesse sentido, é oportuno destacar oito publicações de órgãos governamentais dos EUA que foram consultadas: duas publicações do Estado-Maior Conjunto – em inglês, *Joint Chiefs of Staff* (JCS) – dos EUA, a JP 3-13.1 (JCS, 2012) e a JP 3-85 (JCS, 2020); uma publicação do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea – em inglês, *Air Force Research Laboratory* (AFRL) – dos EUA (AFRL, 2021); e cinco relatórios abordando programas de desenvolvimento de AED, elaborados por uma das agências legislativas do Congresso dos EUA, o Serviço de Pesquisa do Congresso – em inglês, *Congressional Research Service* (CRS):

- a) R41526, abordando programas da USN, com título em inglês *“Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense: Background and Issues for Congress”*, datado de 12 de junho de 2015 (O'ROURKE, 2015);
- b) R45098, sobre programas do Exército dos EUA, com título em inglês *“U.S. Army Weapons-Related Directed Energy (DE) Programs: Background and Potential Issues for Congress”*, datado de 12 de fevereiro de 2018 (FEICKERT, 2018);
- c) R46925, com abordagem a nível do Departamento de Defesa – em inglês, *Department of Defense* (DoD) – dos EUA, e título em inglês *“Department of Defense Directed Energy Weapons: Background and Issues for Congress”*, datado de 28 de setembro de 2021 (SAYLER *et al.*, 2021);
- d) R46458, sobre tecnologias militares emergentes, e título em inglês *“Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress”*, datado de 10 de novembro de 2021 (SAYLER, 2021) e atualizado em 6 de abril de 2022 (SAYLER, 2022), com poucas alterações, mantendo o título original em inglês;
- e) R44175, abordando programas da USN, com título em inglês *“Navy Lasers, Railgun, and Gun-Launched Guided Projectile: Background and Issues for Congress”*, datado de 9 de dezembro de 2021 (O'ROURKE, 2021) e atualizado em 26 de julho de 2022, tendo recebido novo título em inglês, *“Navy Shipboard Lasers: Background and Issues for Congress”* (O'ROURKE, 2022).

Assim, o presente capítulo está estruturado de acordo com os seguintes tópicos: uma visão geral acerca do emprego do laser em atividades militares; alguns conceitos relacionados à Energia Direcionada (ED), de acordo com o entendimento do DoD dos EUA, bem como alguns aspectos acerca do uso da ED; uma visão geral sobre AED nos EUA; uma síntese dos aspectos de AED nos EUA, seguida de três descrições abreviadas de países possuidores de desenvolvimento relevante em ED – Rússia, China e Israel; principais vantagens e limitações da arma a laser a bordo dos navios de superfície; e os princípios éticos do uso de armas laser.

## 2.1 VISÃO GERAL DO EMPREGO DO LASER EM ATIVIDADES MILITARES

Dentre os estudos analisados na revisão de literatura sobre o emprego do laser em atividades militares, Bernatskyi e Sokolovskyi (2022) apresentam um histórico criterioso acerca do assunto, abordando desde os primeiros lasers empregados em sistemas auxiliares até os modernos sistemas a laser. Um aspecto relevante no estudo desses autores são as informações relacionadas aos EUA e a dois potenciais concorrentes estratégicos dos Estados Unidos: a Rússia – com o legado da antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS); e a China.

Embora haja notícias sobre o desenvolvimento de AED por parte de outros países, como Israel, Reino Unido, França, Alemanha, Irã e Turquia (MCCARTHY, 2000, p. 12; ZOHURI, 2021, p. 23), dentre outros, boa parte do conteúdo da presente seção corresponde a fatos relacionados aos EUA e ao legado transferido da antiga União Soviética para a Rússia.

O surgimento da tecnologia laser, no contexto da Guerra Fria, e a polêmica em torno da origem dessa invenção – com três pesquisadores laureados com o Prêmio Nobel de Física de 1964, um estadunidense e dois soviéticos (HECHT; TERESI, 1998, p. 49) – explicam, de certa forma, os avanços obtidos pelos EUA e pela ex-URSS, no tocante ao emprego da tecnologia laser em atividades militares. Cumpre destacar que, após o artigo de Albert Einstein de 1917, sobre emissão estimulada, pesquisadores de diferentes partes do mundo aprofundaram os estudos de Einstein (ver APÊNDICE A).

No início da Guerra Fria, boa parte dos estudos sobre o laser como arma eram classificados como sigilosos; ainda hoje, é bastante difícil avaliar a direção dos trabalhos teóricos daquela época; as fontes mais confiáveis são encontradas como histórias e memórias não oficiais, elaboradas por pesquisadores (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 90).

Entretanto, essa tendência começou a declinar na segunda metade da década de 1970, e foram surgindo artigos versando sobre o uso de lasers para fins militares como, por exemplo, a abordagem sobre o enriquecimento de urânio e obtenção de plutônio militar 238, na revista *Nature* (DICKSON, 1981, p. 401), e o artigo publicado na revista *Scientific American* (TSIPIS, 1981, p. 51-57), descrevendo a possibilidade de uso de lasers de descarga de gás para interceptação de mísseis no espaço (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 90).

Esses, e outros trabalhos, estavam diretamente relacionados ao programa de Iniciativa de Defesa Estratégica dos EUA – em inglês, *Strategic Defense Initiative* (SDI) – anunciado pelo presidente Ronald Reagan em 1983. A SDI, apelidada por alguns como “Guerra nas Estrelas”, pretendia proteger os EUA dos mísseis balísticos intercontinentais por meio de armas defensivas, tanto em terra quanto no espaço. Os lasers desempenhariam um papel fundamental na tecnologia de destruição de mísseis que, porventura, viessem a constituir ameaça para os EUA. A tecnologia ainda não existia, mas Reagan propôs que a nação se dedicasse a desenvolvê-la. A maioria dos princípios teóricos e práticos disponíveis sobre o uso do laser como arma foram delineados após o programa SDI, com significativa evolução após a própria Guerra Fria (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 90; STRAUSS, 2021; ZOHURI, 2021, p. 23).

Os primeiros usos práticos do laser para fins militares foram aplicações auxiliares, como, por exemplo, telêmetros a laser e sistemas de orientação e direcionamento para munições guiadas. Os primeiros telêmetros a laser surgiram na antiga União Soviética, entre 1963 e 1964, desenvolvidos por especialistas do Instituto de Óptica de Vavilov, localizado em Leníngrado – hoje São Petersburgo – na então URSS (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 91).

Todavia, as primeiras aplicações práticas dessa tecnologia são atribuídas à Suécia e à Grã-Bretanha que, entre 1968 e 1970, criaram vários modelos de telêmetros a laser e os instalaram em veículos blindados. Em ambos os casos, os telêmetros foram baseados em um laser de estado sólido que tinha como meio ativo o rubi, o que lhes permitiu medir, com precisão, o alcance. Dos primeiros telêmetros, o britânico Barr & Stroud (1969) deve ser destacado como o primeiro telêmetro a laser documentado, que foi instalado em veículos blindados como parte de seu processo de produção (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 91).

Na década de 1970, os telêmetros a laser tornaram-se a norma para grandes veículos blindados, substituindo completamente os telêmetros estadimétricos e outras formas de telêmetros ópticos. Cada país, com capacidade para fabricação, criou seus próprios tipos de dispositivos a laser, principalmente lasers de estado sólido com diferentes meios ativos. No

caso da então URSS, os sistemas de mira 1G42, 1G46 e 1G46M usavam lasers de estado sólido baseados em meio ativo de quartzo (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 91).

Ao mesmo tempo, os lasers começaram a ser empregados para designação de alvos e guiagem de munições lançadas por aeronaves. O primeiro sistema de designação de alvos a laser instalado em aeronave foi o AN/AVQ-10 dos EUA, adotado em 1969 como o nome “Pave Knife”. O advento dessas tecnologias revolucionou as táticas de uso da aviação, pois tais munições guiadas a laser reduzem drasticamente a quantidade necessária de munições para destruir o alvo designado, ao mesmo tempo em que permitem que essas armas alcancem melhor consistência, precisão e custo-benefício, em comparação às armas convencionais. As forças da OTAN usaram essas munições durante as guerras no Oriente Médio e na ex-Iugoslávia, resultando em um aumento geral da precisão, bem como uma redução relativa de danos colaterais a estruturas civis (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 91; KELLER JR, 2020, p. 29).

Os desenvolvimentos soviéticos nesta área levaram ao desenvolvimento do sistema de mira “Klen-PS” em 1975, que ainda é muito usado em Estados pós-soviéticos, em aeronaves de apoio aéreo aproximado. Deve-se notar que, em contraste com os lasers de estado sólido usados nos projetos ocidentais, os sistemas de orientação soviéticos usavam um heterolaser semicondutor – um tipo de tecnologia laser raramente utilizado, por conta de suas limitações e especificidades (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 92).

Como exemplos atuais de lasers para designação e acompanhamento de alvos, podem ser citados os seguintes: o Litening III, da empresa de Defesa israelense Rafael; o designador para navegação de baixa altitude e direcionamento infravermelho para a noite – em inglês, *Low Altitude Navigation and Targeting Infrared for Night* (LANTIRN) – da empresa Lockheed Martin, dos EUA; e o designador *Sniper Advanced Targeting Pod* (ATP), também da Lockheed Martin (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 92; KELLER JR, 2020, p. 30).

Com o tempo, os lasers instalados em meios aéreos, para designação de alvos e guiagem de munições lançadas por aeronaves, tornaram-se pequenos o suficiente para viabilizar o uso a partir de meios terrestres. Assim, o uso do laser para mísseis guiados anticarro – em inglês, *Anti-Tank Guided Missiles* (ATGM) – tornou-se uma das áreas mais difundidas do uso da tecnologia laser em armamentos (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 93).

Considerados como pioneiros da guiagem a laser em plataformas terrestres, os sistemas soviéticos dos mísseis guiados anticarro “Kobra”, “Agona” e “Refleks” foram implementados no carro de combate T-64B de 1976, e começaram a ser amplamente utilizados em

todos os carros de combate soviéticos da década de 1980. Outro exemplo de míssil anticarro guiado a laser é o “Kombat” ucraniano, destacando-se a mira de carro de combate 1G46M “Promin”, de fabricação ucraniana (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 93).

Com o desenvolvimento da tecnologia a laser, os designadores de alvos a laser tornaram-se compactos o suficiente para serem transportados e usados por apenas um indivíduo. Embora os primeiros sistemas fossem extremamente complicados, o desenvolvimento posterior da tecnologia a laser possibilitou o surgimento de designadores de alvos a laser de tamanhos suficientes para uso confortável (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 93).

O primeiro designador a laser compacto foi o marcador a laser para forças de operações especiais – em inglês, *Special Operation Forces LAser Marker* (SOFLAM) – conhecido como AN/PEQ-1, desenvolvido em 1996, nos EUA, usando laser Nd:YAG<sup>8</sup>. Foi amplamente utilizado por forças especiais do Exército dos EUA no Iraque e no Afeganistão (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 93; KELLER JR, 2020, p. 30).

### **2.1.1 Início do emprego do laser como arma não letal**

Um dos primeiros sistemas a laser projetados para aplicação direta não letal em operações de combate, como unidade de combate independente, foi o complexo soviético 1K17 “Szhatie”, desenvolvido no período de 1982 a 1992 – um sistema a laser projetado para combater dispositivos de detecção optoeletrônicos de veículos inimigos. Estruturalmente, o complexo laser representou um poderoso laser de estado sólido, utilizando cristal de rubi artificial de 30 quilogramas como meio ativo (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 95).

O complexo 1K17 foi projetado para suprimir sistemas de vigilância eletro-óptica e sistemas de controle de incêndio de veículos blindados em condições climáticas e operacionais adversas. Em 1992, o complexo foi adotado, mas poucos foram feitos, pois o preço dos veículos equipados com rubis de 30 quilogramas era simplesmente inacessível para a Rússia pós-soviética. Além disso, o laser exigia muita energia para funcionar. Para alimentá-lo, foi instalado um poderoso gerador, suprido por uma usina auxiliar autônoma, o que levou o tamanho do sistema de laser a dimensões superiores às dimensões dos principais carros de combate existentes naquela época (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 95).

---

8 Nd:YAG é a abreviatura para a expressão inglesa *Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet*, significando granada de ítrio e alumínio dopada com neodímio (SVELTO *et al.*, 2007, p. 585).

Nos círculos analíticos militares, a China é amplamente conhecida como um dos primeiros países a criar e usar sistemas de laser portáteis para cegar pessoal e desativar sensores eletro-ópticos. Em 1987 e, posteriormente, em 1995, a empresa China North Industries Corporation (Norinco), apresentou o ZM-87 *Portable Laser Disturber* em exposições nos Emirados Árabes Unidos e, depois, nas Filipinas (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 95).

O laser de neodímio de quinze megawatts (MW), capaz de descarregar cinco pulsos a cada segundo, foi projetado especificamente para causar danos permanentes aos olhos humanos a uma distância de três a cinco quilômetros (km), juntamente com uma capacidade adicional de infligir cegueira temporária a um alcance de até dez km. No entanto, devido a mudanças na lei internacional, apenas trinta armas foram produzidas, com suas aparições públicas esporádicas até o início dos anos 2000 (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 96).

A continuação do desenvolvimento de tais tecnologias na China é representada pelo desenvolvimento de uma série de dispositivos ofuscantes a laser – sistemas projetados para desativar dispositivos óticos e radares inimigos, onde a cegueira temporária é percebida apenas como um efeito colateral, levando ao seu uso para dispersar reuniões de massa. O mais moderno ofuscante a laser chinês WJG-2002 emite um laser verde, mais prejudicial à visão do que os que emitem no espectro vermelho (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 96).

Ainda sobre o WJG-2002, realiza a emissão de laser três vezes por segundo, sendo capaz de causar tontura e cegueira temporárias. Fabricado com tecnologia de moldagem por injeção de nylon, tem um alcance de apenas cinquenta metros, e sua bateria é capaz de sustentar vinte minutos de emissão contínua (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 96).

O fuzil de resposta à parada e à estimulação de pessoal – do inglês *Personnel Halting and Stimulation Response* (PHaSR) – é um sistema de armas a laser não letal desenvolvido pelo laboratório ScorpWorks no período de 2003 a 2006, para uso nas agências militares e policiais dos EUA. O ScorpWorks é contratado para pesquisa pelo Departamento de Energia Dirigida do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea, localizado na Base da Força Aérea de Kirtland, no Novo México (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 96).

O PHaSR utiliza dois lasers de diodo que emitem na parte não letal do espectro de comprimento de onda: um, no comprimento de onda visível na faixa verde do espectro, e outro, no comprimento de onda na faixa infravermelha do espectro. A luz laser gerada por esta arma provoca cegueira temporária ao oponente e reduz sua capacidade de resistir eficazmente (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 96).



### 2.1.2 Início do emprego do laser em sistemas de defesa aérea e antimísseis

Um motivo relevante para o desenvolvimento de armas a laser corresponde ao uso para se contrapor a ataques de mísseis, em função do contínuo desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de mísseis. O desenvolvimento de emissores de laser de alta potência abriu novas oportunidades para combate a certos tipos de mísseis, uma vez que contramedidas eficazes em oposição a tais mísseis constituem problema, quando são considerados os princípios tradicionais de Defesa aérea e antimísseis (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 97).

A então URSS foi o primeiro Estado a alcançar resultados significativos nesta área de pesquisa. O primeiro trabalho nesse sentido foi realizado na instalação “Terra-3”, construída no Cazaquistão entre 1966 e 1968. A criação de armas a laser, capazes de realizar defesa antimísseis e, ao mesmo tempo, cobrir pontos de importância estratégica de um possível ataque de diversas armas, incluindo mísseis balísticos intercontinentais com ogivas nucleares, foi o principal objetivo do programa “Terra-3” (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 97).

A tarefa não foi concluída com sucesso, pois nem mesmo a construção do protótipo do sistema de defesa de ponto a laser pôde ser concluída. Por esta razão, em 1978, foram suspensos os trabalhos de pesquisa na unidade “Terra-3”. No entanto, as atividades de P&D, realizadas no complexo “Terra-3”, avançaram significativamente a ciência e tecnologia soviética em assuntos relacionados ao programa. Posteriormente, uma parte significativa dos desenvolvimentos realizados no complexo “Terra-3” encontrou aplicação em outros projetos de sistemas a laser de várias finalidades (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 97).

Uma dessas aplicações corresponde aos estudos realizados a bordo do laboratório de vôo “1A” – também conhecido como A-60 – construído pelo G. M. Beriev Design Bureau no início de 1977. A bordo dessa aeronave, foi instalado um sistema de laser projetado para estudar a propagação do laser na alta atmosfera. De acordo com as informações disponíveis, a pesquisa foi realizada com a cooperação de vários escritórios projetistas, empresas e organizações científicas em toda a URSS e, dentre esses, o principal escritório era o Central Marine Design Bureau “Almaz” (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 98; CORRÊA, 2018, p. 205).

O avião IL-76MD, escolhido como aeronave base para a criação do laboratório de vôo A-60, passou por mudanças significativas que alteraram sua aparência. Dois geradores com capacidade de potência total de 2,1 MW foram instalados a bordo da aeronave, mas,

infelizmente, a única informação adicional disponível sobre o sistema de laser é que ele utilizou um laser de CO<sub>2</sub> (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 98).

Durante os testes de 1984, foi realizada uma série de tiros de teste contra alvos aéreos que vão desde balões até antigos caças La-17. No entanto, de acordo com alguns relatos, o laboratório de voo “1A” foi incendiado em 1986, enquanto seu descendente, o laboratório de voo “1A2”, foi usado como aeronave de transporte por um longo tempo. Há notícias que, entre 2012 e 2016, a aeronave foi reequipada com um novo conjunto de lasers. A possibilidade de uso de sistemas de laser aéreo para desativação de satélites também está sendo considerada (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 99).

O próximo projeto soviético foi a criação do 17F19DM “Skif-DM” – uma plataforma com laser de CO<sub>2</sub> para instalação no espaço, verdadeiramente gigantesca – em resposta a uma declaração da Força Aérea dos EUA sobre a implantação planejada de armas nucleares no espaço. De acordo com os projetistas, o módulo incrivelmente pesado de 80 toneladas não pôde ser lançado no espaço por razões políticas, enquanto suas soluções de projeto, que permitem que o laser seja estável e eficiente no espaço, ainda impressionem as mentes dos engenheiros por sua complexidade (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 99).

Há poucas informações disponíveis sobre o análogo estadunidense – equivalente no tempo – do A-60: o laboratório de voo da Boeing, baseado no Boeing NKC-135A. Ele foi empregado para estudar a possível aplicação aérea de lasers durante a Guerra Fria, utilizando um laser de CO<sub>2</sub> com comprimento de onda de 10,6 micrômetros (μm), em uma série de testes não divulgados (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 100; CORRÊA, 2018, p. 205).

Muito mais se sabe sobre seu descendente – o laboratório de voo Boeing YAL-1, que foi revelado ao público em 2003, embora seu desenvolvimento tenha começado em 1996. Inicialmente, a instalação do laser a bordo da aeronave consistiu em seis lasers químicos de oxigênio-iodo com comprimento de onda de 1,315 μm e potência de até 1 MW. De 2007 a 2010, uma série de testes bem-sucedidos de interceptação de mísseis foram realizados, após os quais foi anunciado que os testes desse sistema haviam sido concluídos com sucesso. No entanto, em 2010, devido à redução do orçamento, o projeto foi interrompido. A aeronave foi finalmente desmontada em 2014 (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 100).

Dados históricos adicionais sobre o desenvolvimento de laser de alta energia são apresentados na seção 2.3.1, que versa sobre experiências da USN com laser a bordo dos navios, bem como na seção 2.4, que aborda alguns fatos sobre AED relacionados à Rússia, China

e Israel. Na seção a seguir, serão apresentados alguns conceitos associados à ED, de acordo com o entendimento do DoD dos EUA.

## 2.2 ENERGIA DIRECIONADA

Na presente seção, serão apresentados os conceitos de ED, AED, Guerra de ED (GED) e HEL de acordo com o entendimento do DoD dos EUA. Esses conceitos podem ser encontrados, por exemplo, em publicações do JCS, como a JP 3-13.1 (JCS, 2012) e a JP 3-85 (JCS, 2020), bem como no relatório nº R45098 elaborado pelo CRS para o Congresso dos EUA em 2018 (FEICKERT, 2018). Também serão citadas algumas considerações encontradas em publicações governamentais dos EUA, sobre o uso da ED e sua importância.

### 2.2.1 Arma de energia direcionada e guerra de energia direcionada

De acordo com o DoD, o termo em inglês *Directed-Energy* (DE) – correspondendo a ED no presente trabalho – engloba tecnologias que produzem energia eletromagnética concentrada e partículas atômicas ou subatômicas. Já o termo em inglês *Directed-Energy Weapon* (DE *Weapon*) – correspondendo a AED no presente trabalho – expressa um sistema que utiliza ED como meio de incapacitar, danificar, desabilitar ou destruir equipamentos, instalações ou pessoal inimigo (FEICKERT, 2018, p. 1; JCS, 2012, p. ix, I-16 e GL-6; JCS, 2020, p. GL-6).

Quanto ao termo em inglês *Directed-Energy Warfare* (DEW) – expresso como GED no presente trabalho – remete à ação militar envolvendo o uso de armas, dispositivos e contramedidas de ED para incapacitar, causar danos diretos ou destruição de equipamentos, instalações ou pessoal adversário, ou para determinar, explorar, reduzir ou prevenir uso hostil do espectro eletromagnético, por meio de danos, destruição e ruptura. Também inclui ações de proteção a equipamentos, instalações e pessoal, bem como manutenção do uso amistoso do espectro eletromagnético (FEICKERT, 2018, p. 1; JCS, 2012, p. I-16 e GL-6; JCS, 2020, p. GL-6).

### 2.2.2 Laser de alta energia

O HEL pode variar de alguns quilowatts (kW) a megawatts (MW) de potência média (OBERING III, 2020, p. 38). No início das pesquisas com laser, a Agência de Projetos Avançados de Pesquisa de Defesa – em inglês, *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) – definiu o HEL como aquele que poderia produzir uma energia de saída de 10 kW. Esse critério foi rapidamente aumentado para 100 kW e depois para 400 kW (KELLER JR, 2020, p. 32).

Profissionais de Defesa acreditam cada vez mais que HEL com potência contínua de, pelo menos, 20 kW, são tecnologicamente maduros o suficiente para se tornarem a arma principal das forças armadas avançadas (ROSSITER, 2018, p. 33). Na prática, o termo HEL se refere ao dispositivo cuja saída causa a destruição ou neutralização de missão de um alvo, seja um buscador de mísseis eletro-ópticos, um helicóptero em modo de ataque, um míssil balístico intercontinental em voo, ou um satélite em órbita (KELLER JR, 2020, p. 32).

### 2.2.3 Alguns aspectos sobre o uso da energia direcionada

Com o amadurecimento da ED, os sistemas de AED estão se tornando mais prolíficos e poderosos, compondo um subconjunto significativo da área de Guerra Eletrônica (GE). Tecnologia de negação ativa, lasers, armas de radiofrequência, sistemas de AED antissatélite e sistemas de armas de Micro-ondas de Alta Potência – em inglês, *High-Power Microwave* (HPM) – são exemplos de emprego de ED (FEICKERT, 2018, p. 1; JCS, 2012, p. I-16).

Sobre os aspectos positivos do uso da ED, é oportuno mencionar o contido no relatório nº R45098, que expressa que a ED tem potencial de mudar a própria natureza da guerra, com implicações positivas para a segurança nacional dos EUA (FEICKERT, 2018, p. 2):

- a) a ED poderia ser usada como sensor e arma, encurtando, assim, para a escala de segundos, a linha de tempo entre o sensor e o atirador. Dessa forma, sistemas de armas de ED poderiam realizar vários engajamentos contra um alvo, antes que o adversário pudesse responder;
- b) o HEL aerotransportado poderia mudar a natureza do combate aéreo. Aeronaves com HEL poderiam engajar mísseis balísticos, míssil superfície-ar – em inglês, *Surface-to-Air Missile* (SAM) – e outras plataformas aéreas. O HEL poderia, também, ser empregado em veículo aéreo de combate não tripulado – em

- inglês, *Unmanned Combat Aerial Vehicle* (UCAV) – com característica furtiva, permitindo ataques de precisão contra uma ampla variedade de alvos. Armas de HPM também poderiam ser usadas para defender aeronaves contra SAM;
- c) a ED também poderia melhorar, significativamente, as operações de supressão de Defesa aérea inimiga – em inglês, *Suppression of Enemy Air Defense* (SEAD) – permitindo, sob certas circunstâncias, que fosse alcançado o domínio aéreo sobre um adversário em alguns dias ou algumas semanas. Armas de HPM poderiam melhorar, de modo relevante, as capacidades de ataque antirradiação e derrotar os esforços dos sistemas de defesa aérea inimigos de evitar a detecção e o ataque com o desligamento de seus sistemas;
  - d) as AED poderiam prover um avanço importante na defesa antimísseis;
  - e) as AED poderiam impedir o uso, pelo inimigo, de ADM – em inglês, *Weapon of Mass Destruction* (WMD). Armas de HPM, em particular, poderiam ser usadas para atacar instalações de ADM enterradas, reforçadas ou localizadas junto a populações civis ou infraestrutura;
  - f) as AED, particularmente armas de HPM, poderiam aumentar a capacidade de conduzir operações precisas e baseadas em efeitos. As AED poderiam contornar uma das estratégias assimétricas mais problemáticas empregadas pelos adversários: uso de civis como escudos. Embora os HEL ofereçam uma capacidade de ataque de precisão para ajudar a reduzir baixas civis, armas de HPM podem atacar, praticamente, qualquer sistema eletrônico, sem causar danos diretos a civis próximos;
  - g) as AED poderiam facilitar operações estratégicas como, por exemplo, interromper a geração e distribuição de energia. As AED poderiam ser usadas em ataques estratégicos selecionados contra sistemas industriais e infraestrutura militar dependente de energia elétrica e sistemas eletrônicos. Os efeitos podem variar desde a interrupção do serviço a curto prazo até a destruição do subsistema;
  - h) as AED também poderiam fornecer um meio para os EUA obter controle do espaço, dentro dos limites adequados. Defensivamente, as AED poderiam fornecer proteção aos ativos dos EUA e aliados baseados no espaço. Empregadas

ofensivamente, as AED poderiam, temporariamente, negar o uso de ativos espaciais por adversários e danificar ou destruir satélites inimigos.

É oportuno mencionar o documento publicado pelo AFRL, que aborda cenários sobre tecnologias de ED para um horizonte de 40 anos, com o título original em inglês “*Directed Energy Futures 2060: Visions for the next 40 years of U.S. Department of Defense Directed Energy Technologies*”. Tal documento expressa a preocupação do DoD quanto ao número crescente de nações que estão percebendo o potencial da ED para uma variedade de missões militarmente relevantes. Pelo menos 31 nações já possuem AED para missões contra sistemas aéreos não tripulados como, por exemplo, defesa de base (AFRL, 2021, p. iii).

O documento do AFRL menciona também que, atualmente, atores estatais e não estatais têm usado lasers de baixa potência durante operações militares e de policiamento, bem como durante protestos e para pôr em perigo pilotos civis e militares. As AED usadas contra sensores e dispositivos eletrônicos são eficazes em uma variedade de plataformas – aéreas, terrestres e baseadas em navios – em várias fases da guerra e intensidades de conflito. O DoD reconhece a crescente criticidade militar das capacidades de ED e vislumbra ações na tentativa de manter os EUA na liderança em ED (AFRL, 2021, p. iii).

É oportuno citar, também, o relatório nº R46458 elaborado para o Congresso dos EUA em 6 de abril de 2022 (SAYLER, 2022), que reforça os aspectos positivos associados ao uso de ED, mencionando que as AED poderiam ser usadas por forças terrestres em missões de defesa antiaérea de curto alcance – em inglês, *SHOrt-Range Air Defense* (SHORAD) – missões contra sistemas aéreos não tripulados – em inglês, *Counter-Unmanned Aerial Systems* (C-UAS) ou missões contra foguetes, artilharia e morteiros – em inglês, *Counter-Rocket, Artillery, and Mortar* (C-RAM). As AED proporcionam baixo custo por tiro e – supondo acesso a uma fonte de energia suficiente – carregadores quase ilimitados que, em contraste com os sistemas convencionais existentes, podem permitir um meio eficiente e eficaz de defesa contra salvas de mísseis ou ataque em massa de sistemas não tripulados (SAYLER, 2022, p. 16).

Na seção a seguir, será apresentada uma visão geral acerca do desenvolvimento de AED nos EUA.

## 2.3 VISÃO GERAL SOBRE ARMA DE ENERGIA DIRECIONADA NOS EUA

Na presente seção, serão abordados os seguintes tópicos: experiências da USN com “Laser de Estado Sólido” – em inglês, *Solid State Laser (SSL)* – a bordo dos navios de superfície; programas de AED priorizados pela USN; programas de AED priorizados no âmbito do DoD; programas de AED priorizados no âmbito da Força Aérea dos EUA – em inglês, *United States Air Force (USAF)*; e programas de AED priorizados pelo Exército dos EUA.

### 2.3.1 Experiências da Marinha dos EUA com laser a bordo dos navios

Nos últimos anos, a USN contribuiu com avanços significativos em SSL industrial e com décadas de trabalho de P&D em lasers militares realizados por outros setores do DoD, resultando em progressos substanciais na implantação de HEL em navios de superfície da USN. Os navios da USN usariam SSL de alta energia, inicialmente, para combater VANT e pequenas embarcações, bem como para bloquear ou confundir sensores de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento – em inglês, *Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (ISR)* – e, potencialmente no futuro, para combater mísseis antinavio inimigos (O'ROURKE, 2022, p. 3).

Os SSL de alta energia, nos navios da USN, seriam armas defensivas de curto alcance. Além de baixo custo por tiro e ampla capacidade de armazenamento de munição, podem ser citadas as seguintes vantagens potenciais dos lasers de bordo: rápido tempo de engajamento; capacidade de combater mísseis que estejam em manobras radicais; engajamentos de precisão; e respostas graduais, desde detectar e monitorar alvos até causar danos incapacitantes (O'ROURKE, 2015, p. 2; O'ROURKE, 2022, p. 3).

As limitações potenciais dos lasers de bordo estão relacionadas aos seguintes fatores: linha de visada; absorção atmosférica, espalhamento e turbulência, que impedem que os lasers de bordo sejam armas para todos os climas; efeito de lente térmica, que pode reduzir a eficácia do laser; ataques de saturação; alvos resistentes e contramedidas; e risco de danos colaterais a aeronaves, satélites e à visão humana (O'ROURKE, 2022, p. 4). Essas vantagens e limitações potenciais serão discutidas com mais detalhes na seção 2.5.

Dentre as experiências associadas aos esforços da USN para o desenvolvimento de SSL, podem ser citadas as seguintes (O'ROURKE, 2021, p. 4; O'ROURKE, 2022, p. 4):

- a) entre 2009 e 2012, um protótipo SSL chamado *Laser Weapon System* (LaWS) foi testado pela USN, com sucesso, contra VANT, em uma série de combates que ocorreram, inicialmente, em terra e, posteriormente, em um navio da USN no mar. O LaWS teve uma potência de feixe relatada de 30 kW;
- b) entre 2010 e 2011, outro protótipo SSL chamado *Maritime Laser Demonstration* (MLD) foi testado pela USN em uma série de testes que culminaram com um MLD instalado em um navio da USN que engajou, com sucesso, uma pequena embarcação;
- c) em agosto de 2014, a USN instalou o LaWS no *United States Ship* (USS) Ponce – um navio anfíbio convertido que operou no Golfo Pérsico – para realizar a avaliação do dispositivo laser em um ambiente operacional com vistas a se contrapor a ataques múltiplos de barcos e de VANT;
- d) em dezembro de 2014, a USN declarou como operacional o LaWS instalado no USS Ponce. O USS Ponce permaneceu no Golfo Pérsico até setembro de 2017, retornou aos EUA e foi descomissionado em outubro de 2017, quando o LaWS foi removido de bordo. O LaWS deve ser reformado para servir como um ativo de teste para o programa *High-Energy Laser with Integrated Optical-dazzler and Surveillance* (HELIOS), que será abordado na seção 2.3.2.

O relatório CRS nº R44175 (O'ROURKE, 2021; O'ROURKE, 2022), afirma que, embora os navios de superfície da USN possuam meios para se defender contra embarcações de superfície, VANT e mísseis antinavio, alguns observadores estão preocupados com a capacidade de sobrevivência dos navios da USN em possíveis situações de combate contra adversários como a China, que estão armados com grande número de VANT e mísseis antinavio. Dois problemas importantes que os navios de superfície da USN podem enfrentar, para se defender contra VANT e mísseis antinavio, merecem destaque: limitação de armazenamento de munição; e custo por disparo desfavorável (O'ROURKE, 2021, p. 1-2; O'ROURKE, 2022, p. 2).

A limitação de armazenamento de munição pode ser explicada, por exemplo, por uma situação em que um navio da USN utilize SAM e armamento do sistema de armas de defesa de ponto – em inglês, *Close-in Weapon System* (CIWS) – para abater apenas um certo número de VANT e mísseis antinavio inimigos, antes de ficar sem munição de SAM e CIWS. Tal situação pode exigir que o navio se retire do combate, navegue até um local de recarga seguro



– que pode estar a centenas de quilômetros de distância – e, em seguida, gaste mais tempo navegando de volta para o combate (O'ROURKE, 2021, p. 2; O'ROURKE, 2022, p. 2).

O custo por disparo desfavorável pode ser explicado, por exemplo, pelo fato de que um SAM usado contra um VANT ou míssil antinavio pode custar mais do que custou, ao adversário, a construção ou aquisição do VANT ou do míssil antinavio. Os custos de aquisição de mísseis de defesa antiaérea da USN variam de várias centenas de milhares de dólares a alguns milhões de dólares por míssil, dependendo do tipo. Em cenários de combate contra a China, um país com muitos VANT e mísseis antinavio e capacidade para construir ou adquirir muitos mais, o custo por disparo pode se tornar desfavorável para a USN e dificultar a Defesa dos navios de superfície contra VANT e mísseis antinavio, particularmente em um contexto de restrições aos gastos de Defesa (O'ROURKE, 2021, p. 2; O'ROURKE, 2022, p. 2).

Os SSL têm potencial para melhorar, drasticamente, a capacidade de armazenamento de munição e o custo por disparo. No caso da capacidade de munição, os SSL são alimentados eletricamente, extraindo sua energia do suprimento elétrico do navio, e podem ser disparados repetidamente, indefinidamente, desde que o laser continue funcionando e o navio tenha combustível para gerar eletricidade. Quanto ao custo por disparo, dependendo da potência do feixe, um SSL pode ser disparado por um custo marginal estimado entre US\$ 1 e US\$ 10 por disparo – muito do qual é, simplesmente, o custo do combustível necessário para gerar a eletricidade usada no disparo (O'ROURKE, 2021, p. 3; O'ROURKE, 2022, p. 3).

Cumprir mencionar que os SSL têm potência de feixe suficiente para combater pequenas embarcações e VANT, mas não o suficiente para combater míssil de cruzeiro antinavio – em inglês, *Anti-Ship Cruise Missile* (ASCM). Entretanto, os SSL podem melhorar, indiretamente, a capacidade de um navio para combater ASCM, permitindo que o navio use menos de seus SAM para combater VANT, direcionando, portanto, o SAM para o combate ao ASCM (O'ROURKE, 2021, p. 3; O'ROURKE, 2022, p. 3).

### **2.3.2 Programas de arma de energia priorizados na Marinha dos EUA**

Os relatórios CRS nº R46925 (SAYLER *et al.*, 2021) e nº R44175 (O'ROURKE, 2021; O'ROURKE, 2022) citam que, em 2014, a USN instalou, em um de seus navios, o seu primeiro protótipo SSL capaz de combater embarcações de superfície e VANT. Desde então, a USN vem desenvolvendo e instalando protótipos SSL adicionais com capacidade aprimorada para

combater embarcações de superfície e VANT. Os SSL de maior potência que estão sendo desenvolvidos pela USN devem ter a capacidade de combater ASCM. Os esforços atuais da USN para desenvolver SSL incluem os seguintes programas:

- a) amadurecimento da tecnologia laser de estado sólido – em inglês, *Solid State Laser Technology Maturation (SSL-TM)*;
- b) interditor ofuscante óptico da Marinha – em inglês, *Optical Dazzling Interdicator, Navy (ODIN)*;
- c) incremento 1 do sistema de arma laser de superfície da Marinha, também conhecido como laser de alta energia com ofuscamento óptico e vigilância integrados – em inglês, *Surface Navy Laser Weapon System (SNLWS) Increment 1, also known as HELIOS*;
- d) programa de laser de alta energia para combater ASCM – em inglês, *High Energy Laser Counter-ASCM Program (HELCAP)*.

Os três primeiros programas de SSL (SSL-TM, ODIN e HELIOS) estão incluídos na família de sistemas de laser da USN – em inglês, *Navy Laser Family of Systems (NLFoS)*. O quarto programa da NLFoS, o *Ruggedized High Energy Laser (RHEL)*, não está listado, por já estar concluído. Os três programas NLFoS e o HELCAP, juntamente com tecnologias desenvolvidas por outros setores do DoD, devem apoiar o desenvolvimento de futuros lasers mais capazes, chamados de *SNLWS Increment 2* e *SNLWS Increment 3* (O'ROURKE, 2022, p. 6).

A seguir, serão apresentadas informações adicionais sobre esses quatro programas, e alguns comentários sobre desafios para o desenvolvimento dos SSL de alta energia.

#### *Solid State Laser Technology Maturation*

O programa SSL-TM desenvolveu um protótipo de laser de bordo chamado de demonstrador de sistema de armas a laser – em inglês, *Laser Weapons System Demonstrator (LWSD)* – para suprir lacunas de capacidade conhecidas contra ameaças assimétricas como UAS, pequenas embarcações e sensores de ISR – e informará futuras estratégias de aquisição, projetos de sistemas, arquiteturas de integração e planos de campo planos para sistemas de armas a laser (O'ROURKE, 2022, p. 7; SAYLER *et al.*, 2021, p. 12).

Equipes do setor industrial lideradas pela BAE Systems, Northrop Grumman e Raytheon, dentre outras, competiram para desenvolver um LWSD com potência de feixe de até 150 kW. Em 22 de outubro de 2015, o DoD anunciou que havia selecionado a Northrop

Grumman como vencedora da competição SSL-TM. Em janeiro de 2018, a USN anunciou que pretendia instalar o LWSD no navio anfíbio Portland (LPD-27). O sistema teria sido instalado no navio no outono de 2019. Em 22 de maio de 2020, a USN anunciou que o Portland havia usado seu LWSD para desativar, com sucesso, um VANT em um teste no mar realizado em 16 de maio de 2020 (O'ROURKE, 2022, p. 7; SAYLER *et al.*, 2021, p. 12-13).

A USN completou o trabalho com o LWSD instalado no Portland. De acordo com a apresentação do orçamento do ano fiscal de 2023 da USN, o trabalho a ser feito durante o ano fiscal de 2023 deve incluir o início da desinstalação do LWSD de Portland, completando o relatório final, fechando o programa e descartando o hardware após sua remoção do Portland. A desinstalação do LWSD e o encerramento do programa devem ser concluídos até o final do terceiro trimestre do ano fiscal de 2024 (O'ROURKE, 2022, p. 7).

#### *Optical Dazzling Interdictor, Navy*

Os sistemas ODIN estão sendo instalados em oito contratorpedeiros da classe Arleigh Burke (DDG-51). A primeira instalação do ODIN foi feita no contratorpedeiro Dewey (DDG-105) em 2019. O ODIN foi projetado para fornecer ED de curto prazo, para se contrapor a ações de ISR, ofuscando UAS e outras plataformas que demandassem necessidades operacionais urgentes da Esquadra (O'ROURKE, 2022, p. 11; SAYLER *et al.*, 2021, p. 13).

O ano fiscal de 2018 foi o primeiro ano de financiamento de apoio ao projeto, desenvolvimento, aquisição e instalação de unidades autônomas ODIN dentro do Programa de Defesa para os Anos Futuros – em inglês, *Future Years Defense Program* (FYDP) – para implantação em navios da classe DDG-51 Flight IIA. O programa apoia a engenharia não recorrente, desenvolvimento, aquisição de material de longa duração, montagem e verificação final, certificação do sistema, integração, instalação de plataforma e sustentação para essas unidades autônomas ODIN (O'ROURKE, 2022, p. 11).

A solicitação de orçamento para o ano 2023 prevê: suporte técnico a bordo, verificação de teste, atualizações de treinamento, atualizações de requisitos de manutenção e documentação de subsídio a bordo, e Operação e Sustentação – em inglês, *Operation and Sustainment* (O&S) – das unidades 1-7; aquisição, montagem, verificação final, integração, e Teste e Avaliação – em inglês, *Test and Evaluation* (T&E) – da unidade 8; e o desenvolvimento do pacote de atualização de tecnologia e esforços de maturação do subsistema para melhorar a confiabilidade, capacidade e operabilidade do ODIN (O'ROURKE, 2022, p. 11-12).

### High-Energy Laser with Integrated Optical-dazzler and Surveillance

O incremento 1 do SNLWS (HELIOS) está focado no rápido desenvolvimento e rápida colocação em campo de um laser de alta energia de 60 kW (com potencial de crescimento para 150 kW) ofuscante e integrado a um sistema de armas, para uso no combate a UAS, pequenas embarcações e sensores de ISR, e para identificação de combate e avaliação de danos de batalha. A instalação do HELIOS, em um contratorpedeiro DDG-51 Flight IIA, deve ser concluída no ano fiscal 2022 (O'ROURKE, 2022, p. 14; SAYLER *et al.*, 2021, p. 13).

A apresentação do orçamento de 2023 da USN afirma que o HELIOS fornece uma capacidade de baixo custo por tiro para combate aos alvos já mencionados e contra embarcações de ataque rápido costeiro – em inglês, *Fast Inshore Attack Craft* (FIAC) – enquanto integrado ao Sistema de Combate AEGIS em um contratorpedeiro DDG-51 Flight IIA. O SNLWS fornece à Esquadra recursos desenvolvidos pela indústria e integrados pelo governo no menor prazo possível, alinhado à orientação da Estratégia Nacional de Defesa dos EUA quanto à promoção da cultura de inovação (O'ROURKE, 2022, p. 15).

O SNLWS inclui o desenvolvimento de um sistema de armas a laser na classe de 60 kW ou superior. O SNLWS aproveita a tecnologia consolidada que fornecerá uma capacidade madura do sistema de armas a laser para a Esquadra. O desenvolvimento do SNLWS aproveita os esforços dos desenvolvimentos conjuntos: o LaWS com o *Solid State Laser Quick Reaction Capability* (SSL QRC); e o SSL-TM com o LWSD (O'ROURKE, 2022, p. 15).

A solicitação de orçamento do ano fiscal 2023 prevê a execução de testes no mar após a conclusão e instalação bem-sucedida do Mk5 Mod0 HELIOS no USS Preble (DDG 88) durante a disponibilidade de modernização do AEGIS no ano fiscal 2022, serviços de engenharia técnica durante os testes e suporte de manutenção e reparo do sistema, conforme necessário, para incluir aquisição ou produção de peças de reparo e atualizações para materiais de treinamento e entregas associadas para quaisquer alterações identificadas durante os testes no mar (O'ROURKE, 2022, p. 15-16).

### High Energy Laser Counter Anti-Ship Cruise Missile Program

A apresentação do orçamento da USN para o ano de 2023 afirma que o HELCAP agilizará o desenvolvimento, experimentação, integração e demonstração de tecnologias críticas para combater ASCM, abordando os desafios técnicos restantes como, por exemplo: turbulência atmosférica, identificação automática de alvos e seleção de ponto de mira,

rastreamento preciso de alvo com baixo retardo em condições de alta desordem, controle avançado de feixe e desenvolvimento de HEL de maior potência (O'ROURKE, 2022, p. 18).

#### Desafios remanescentes

É oportuno mencionar o constante no relatório do CRS nº R44175 (O'ROURKE, 2021; O'ROURKE, 2022) quanto aos desafios técnicos que devem ser enfrentados no desenvolvimento dos SSL de alta energia. O relatório menciona que alguns céticos, por vezes, destacam que iniciativas de lasers militares de alta energia fizeram inúmeras previsões de entregas ao longo dos anos, e que tais previsões, repetidamente, não aconteceram.

O relatório R44175 cita ainda que, pelo registro de previsões não cumpridas, já houve comentários céticos de que “os lasers estão X anos no futuro – e sempre estarão”. Os que são favoráveis ao laser reconhecem as previsões não cumpridas, mas argumentam que a situação mudou, devido aos rápidos avanços na tecnologia SSL e à mudança em relação às metas ambiciosas anteriores – como, por exemplo, o desenvolvimento de lasers de potência de MW para combater alvos em dezenas ou centenas de quilômetros – para objetivos mais realistas – como, por exemplo, desenvolvimento de lasers de potência de kW para combate a alvos a não mais do que alguns quilômetros (O'ROURKE, 2021, p. 22; O'ROURKE, 2022, p. 21).

### **2.3.3 Programas de arma de energia priorizados no Departamento de Defesa**

De acordo com o relatório nº R46925 para o Congresso dos EUA, datado de 28 de setembro de 2021 (SAYLER *et al.*, 2021), os programas de ED, a nível do DoD dos EUA, são coordenados pelo Diretor Principal de ED, no âmbito do Gabinete do Subsecretário de Defesa para Pesquisa e Engenharia – em inglês, *Office of the Under Secretary of Defense for Research and Engineering*, correspondente ao acrônimo OUSD(R&E). Dentre as atribuições do Diretor Principal de ED, está o desenvolvimento e supervisão do Roteiro de ED, que articula a meta do DoD de alcançar a superioridade em aplicações militares de ED em todas as missões e domínios em que a ED possa proporcionar vantagem (SAYLER *et al.*, 2021, p. 2).

Além do Roteiro de ED, o OUSD(R&E) gerencia a Iniciativa de Escala de Laser de Alta Energia – em inglês, *High Energy Laser Scaling Initiative* (HELSEI) – que busca estimular iniciativas de desenvolvimento tecnológico que resultem em potências de saída do laser cada vez maiores, enquanto mantém ou melhora a qualidade e a eficiência do feixe. Dessa forma, o HELSEI colabora com o fortalecimento da BID dos EUA (SAYLER *et al.*, 2021, p. 3).

O OUSD(R&E) concluiu uma revisão do processo de análise de letalidade do laser em todo o DoD, para identificar necessidades futuras e melhores práticas para desenvolvimento e uso de ED. Além disso, está estabelecendo um banco de dados sobre letalidade de ED, um repositório pesquisável para análises de ED do DoD (SAYLER *et al.*, 2021, p. 3).

O DoD mantém vários programas de pesquisa em toda a Defesa, incluindo programas na Agência da Defesa para Mísseis – em inglês, *Missile Defense Agency* (MDA) – no Gabinete do Secretário de Defesa – em inglês, *Office of the Secretary of Defense* (OSD) – e na Agência de Projetos Avançados de Pesquisa de Defesa – em inglês, *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), em apoio às iniciativas de ED (SAYLER *et al.*, 2021, p. 4).

No âmbito da MDA, por exemplo, há o programa de desenvolvimento de demonstradores de ED que objetiva a redução de risco de tecnologia e maturação para lasers estratégicos de alta potência, controle de feixe, letalidade e tecnologias relacionadas, em apoio ao Roteiro de ED do OUSD(R&E). O programa recebeu US\$ 42 milhões no ano fiscal de 2021. O MDA não solicitou financiamento para o programa no ano fiscal de 2022; entretanto, os testes do programa estão previstos para até 2022 (SAYLER *et al.*, 2021, p. 4).

Outro exemplo é o OSD, que solicitou US\$ 15 milhões no ano fiscal de 2022, para iniciativas de pesquisa em HEL, incluindo pesquisa básica e subsídios educacionais, e US\$ 46 milhões para desenvolvimento de HEL, com financiamento em pesquisa aplicada. O OSD solicitou, adicionalmente, US\$ 107 milhões no ano de 2022, para o desenvolvimento avançado de HEL, visando a obter potências de saída do laser cada vez maiores, alcançando níveis de energia operacionalmente eficazes, aplicáveis a amplas áreas de missão em todo o DoD. O OSD solicitou mais US\$ 11 milhões no ano de 2022 para continuar as avaliações de AED, incluindo avaliações dos efeitos, eficácia e limitações das armas (SAYLER *et al.*, 2021, p. 4).

Ainda como exemplo de programa a nível do DoD, há o programa *Waveform Agile Radio-frequency Directed ENergy* (WARDEN), da DARPA, que visa a estender o alcance e a letalidade de armas de HPM para missões contra sistemas aéreos não tripulados, interrupção de veículos e embarcações, ataque eletrônico e Defesa contra mísseis guiados. A DARPA recebeu US\$ 6 milhões para o WARDEN no ano fiscal de 2021 e solicitou US\$ 15 milhões para o ano fiscal de 2022 (SAYLER *et al.*, 2021, p. 4).

Na seção a seguir, serão abordados os principais programas de AED no âmbito da Força Aérea dos EUA.

### 2.3.4 Programas de arma de energia priorizados na Força Aérea dos EUA

O relatório do CRS nº R46925 (SAYLER *et al.*, 2021) menciona cinco programas de AED no âmbito da USAF:

- a) respondedor operacional tático de micro-ondas de alta potência – em inglês, *Tactical High-Power Microwave Operational Responder* (THOR) – projetado pelo AFRL, em colaboração com parceiros do setor;
- b) sistema de micro-ondas de alta potência Phaser – em inglês, *Phaser High-Powered Microwave* – em desenvolvimento pela Raytheon;
- c) contra-eletrônica por meio de micro-ondas de alta potência para defesa antiaérea em alcance estendido – em inglês, *Counter-electronic High Power Microwave Extended Range Air base defense* (CHIMERA) – previsto no contrato entre o AFRL e a Raytheon Mísseis e Defesa;
- d) sistema de armas a laser de alta energia – em inglês, *High-Energy Laser Weapon System* (HELWS) – em desenvolvimento pela Raytheon;
- e) demonstrador de laser de alta energia de autoproteção – em inglês, *Self-protect High-Energy Laser Demonstrator* (SHIELD) – em desenvolvimento pela AFRL, Boeing, Lockheed Martin e Northrop Grumman.

#### *Tactical High-Power Microwave Operational Responder*

O demonstrador tecnológico THOR é desenvolvido como um sistema de armas de ED com capacidade C-UAS viável, focado na defesa antiaérea de curto alcance. O THOR é alojado em um contêiner de transporte padronizado de 20 pés, o que permite que ele caiba em uma aeronave de transporte C-130. Os usuários podem implantar o sistema em três horas e operar sua interface de usuário apenas com treinamento rudimentar. De acordo com comunicados da USAF, o THOR completou, com sucesso, um período de teste de dois anos e deve informar os esforços de protótipos subsequentes (SAYLER *et al.*, 2021, p. 5).

#### *Phaser High-Powered Microwave*

O sistema de micro-ondas de alta potência Phaser se destina a fornecer uma capacidade C-UAS de curto alcance, à semelhança do THOR. A USAF teria adquirido um protótipo Phaser de US\$ 16,3 milhões para testes e avaliações de campo no exterior; no entanto, não está claro se o sistema foi implantado fora dos EUA (SAYLER *et al.*, 2021, p. 5).

#### Counter-electronic High Power Microwave Extended Range Air base defense

O sistema CHIMERA, em contraste com o THOR e o Phaser, que são projetados para missão C-UAS de curto alcance, destina-se ao engajamento de sistemas aéreos não tripulados – em inglês, *Unmanned Aerial Systems* (UAS) – em distâncias superiores. Informações não classificadas sobre o sistema CHIMERA são limitadas (SAYLER *et al.*, 2021, p. 6).

#### High-Energy Laser Weapon System

O HELWS deve servir como uma capacidade móvel de C-UAS para Defesa antiaérea. O sistema compreende uma arma a laser e um sistema de mira multiespectral montado na parte traseira de um veículo Polaris MRZR, e pode operar a distâncias de até 3 km. A Raytheon, desenvolvedora do HELWS, afirma que o laser pode disparar dezenas de tiros usando uma única carga de uma tomada padrão de 220 volts, e um número indefinido de tiros, se conectado a uma fonte de energia externa, como um gerador. A USAF adquiriu o primeiro HELWS em outubro de 2019 e, supostamente, implantou o HELWS no exterior, para avaliações de campo, em abril de 2020. A USAF também concedeu, à Raytheon, em abril de 2021, um contrato de US\$ 15,5 milhões para uma versão atualizada, que deverá ser entregue desmontada para uso potencial em diferentes plataformas (SAYLER *et al.*, 2021, p. 6).

#### Self-protect High-Energy Laser Demonstrator

O SHIELD é um sistema protótipo destinado a compor um casulo externo em aeronaves da USAF – de caças F-15 de quarta geração a aeronaves de sexta geração atualmente em desenvolvimento – com vistas a contrapor mísseis ar-ar e superfície-ar. A USAF conduziu, em abril de 2019, uma série de testes do *Demonstrator Laser Weapon System*, um substituto de teste, baseado em terra, para o SHIELD. O demonstrador engajou com sucesso os mísseis de entrada e ajudou a validar a tecnologia da SHIELD; no entanto, desafios técnicos e desafios relacionados à pandemia de COVID-19 teriam empurrado a primeira demonstração de voo do SHIELD do ano fiscal de 2021 para o ano fiscal de 2024 (SAYLER *et al.*, 2021, p. 7).

### **2.3.5 Programas de arma de energia priorizados no Exército dos EUA**

O relatório do CRS nº R46925 (SAYLER *et al.*, 2021) menciona três iniciativas de AED no âmbito do Exército dos EUA:



- a) HEL multimissão, e manobra de ED para defesa antiaérea de curto alcance – em inglês, *Multi-Mission HEL (MMHEL) and Directed Energy Maneuver Short-Range Air Defense (DE M-SHORAD)*;
- b) demonstrador de veículo tático para laser de alta energia, e capacidade de proteção indireta contra incêndio por laser de alta energia – em inglês, *High Energy Laser Tactical Vehicle Demonstrator (HEL TVD) and Indirect Fire Protection Capability-High Energy Laser (IFPC-HEL)*;
- c) IFPC-micro-ondas de alta potência – *IFPC-High Power Microwave (HPM)*.

*Multi-Mission High-Energy Laser and Directed Energy Maneuver Short-Range Air Defense*

O MMHEL busca integrar um laser classe 50 kW em um veículo de combate Stryker para fornecer suporte SHORAD às brigadas de manobra do Exército. O Exército declarou que o custo médio por engajamento é de, aproximadamente, US\$ 30. Há previsão do programa DE M SHORAD entregar quatro protótipos em 2022 (SAYLER *et al.*, 2021, p. 8).

*High Energy Laser Tactical Vehicle Demonstrator and Indirect Fire Protection Capability-High Energy Laser*

O HEL TVD envolve o desenvolvimento de um laser de 100 kW para ser montado em um caminhão da família de veículos táticos médios – em inglês, *Family of Medium Tactical Vehicles (FMTV)* – para fornecer capacidade C-RAM para proteção de locais fixos, bem como fornecer proteção limitada em modo móvel. Além disso, o HEL TVD pode ser adaptado para uma função de SHORAD com vistas à proteção contra VANT e, caso dimensionado com sucesso para níveis de potência mais altos, mísseis de cruzeiro (SAYLER *et al.*, 2021, p. 9).

Em março de 2019, o Exército anunciou que a Dynetics e a Lockheed Martin receberam um contrato de US\$ 130 milhões para desenvolver o HEL TVD. O Exército busca aumentar a potência do HEL TVD para 300 kW e alavancar a tecnologia dentro do programa IFPC-HEL. O IFPC-HEL está programado para concluir as demonstrações iniciais no ano fiscal de 2022, entregar quatro protótipos no ano fiscal de 2024, e fazer a transição para um programa de registro no ano fiscal de 2025 (SAYLER *et al.*, 2021, p. 9).

O conflito entre a Rússia e a Ucrânia, iniciado em fevereiro de 2022, deflagrou uma preocupação mundial quanto a questões econômicas e de energia, dentre outras, aumentando a relevância do setor de Defesa e reascendendo a corrida por armamentos com

tecnologia de ponta. Nesse sentido, serão apresentados, a seguir, como uma breve comparação, comentários sobre o desenvolvimento de ED nos EUA, e em três países: Rússia e China, potências militares que, no cenário atual, configuram-se como concorrentes estratégicos dos EUA; e Israel, aliado dos EUA.

## 2.4 SINOPSE SOBRE ENERGIA DIRIGIDA NOS EUA, RÚSSIA, CHINA E ISRAEL

Na presente seção, serão ressaltados alguns aspectos do desenvolvimento de ED nos EUA, como uma sinopse para comparação com três descrições abreviadas de países possuidores de desenvolvimento relevante em ED: Rússia e China, potenciais concorrentes estratégicos dos EUA; e Israel, importante aliado dos EUA no Oriente Médio. O conteúdo principal foi extraído dos relatórios do CRS nº R45098 (FEICKERT, 2018) e nº R46458 (SAYLER, 2022).

### 2.4.1 EUA

De acordo com o relatório do CRS nº R46458 (SAYLER, 2022), embora os EUA venham pesquisando ED desde a década de 1960, alguns especialistas consideram que os programas voltados para o desenvolvimento de ED frequentemente ficam aquém das expectativas, tendo o DoD investido bilhões de dólares em programas que já foram cancelados. Há outros que inferem que os desenvolvimentos em lasers comerciais poderiam ser aproveitados para aplicações militares (SAYLER, 2022, p. 16).

Os programas de AED continuam enfrentando questões quanto à maturidade tecnológica, incluindo questões sobre a capacidade de melhorar a qualidade e o controle do feixe para níveis militarmente úteis e a capacidade de atender aos requisitos de energia, resfriamento e tamanho para integração nas plataformas atuais (SAYLER, 2022, p. 16-17).

Cumprir mencionar, novamente, que a USN colocou em funcionamento, em 2014, a bordo do USS Ponce, a primeira AED dos EUA, o LaWS, um protótipo de laser de 30 kW capaz de derrubar drones, desabilitar pequenas embarcações ou danificar helicópteros. A USN está testando e planeja instalar seu laser de 60 kW, HELIOS, no USS Preble, enquanto o Exército planeja colocar em campo, em veículos de combate Stryker, o sistema de ED móvel de defesa antiaérea de curto alcance de 50 kW no ano fiscal de 2022. Da mesma forma, a USAF está,

atualmente, realizando avaliações de vários sistemas DE contra UAS, incluindo sistemas de laser e micro-ondas de alta potência (SAYLER, 2022, p. 17).

O Roteiro de ED do DoD descreve o plano da Defesa para aumentar os níveis de potência das armas HEL de cerca de 150 kW, como é atualmente viável, para cerca de 300 kW até o ano fiscal de 2022, 500 kW até o ano fiscal de 2024 e 1 MW até o ano fiscal de 2030 (SAYLER *et al.*, 2021, p. 3; SAYLER, 2022, p. 17).

Embora não exista consenso em relação ao nível de potência necessário para neutralizar diferentes conjuntos de alvos, documentos do DoD sugerem que um laser de, aproximadamente, 100 kW poderia engajar UAS, foguetes, artilharia e morteiros, ao passo que um laser de cerca de 300 kW poderia, adicionalmente, engajar pequenas embarcações e mísseis de cruzeiro se deslocando em determinados perfis. Lasers de 1 MW poderiam, potencialmente, neutralizar mísseis balísticos e armas hipersônicas (SAYLER *et al.*, 2021, p. 3).

No geral, o DoD solicitou cerca de US\$ 578 milhões no ano fiscal de 2022 para pesquisa, desenvolvimento, teste e avaliação – em inglês, *Research, Development, Test, and Evaluation* (RDT&E) – de ED não classificados e, pelo menos, US\$ 331 milhões para aquisição de armas de ED não classificadas (SAYLER *et al.*, 2021, p. 4; SAYLER, 2022, p. 17).

#### 2.4.2 Rússia

A antiga URSS, supostamente, começou a realizar experiências com lasers nas décadas de 1950 e 1960. Na década de 1970, a então URSS desenvolveu sistemas terrestres fixos destinados a destruir mísseis balísticos em sua fase terminal de descida. Após o “Tratado de Mísseis Antibalísticos de 1972”<sup>9</sup> – em inglês, *The 1972 Anti-Ballistic Missile (ABM) Treaty* – os soviéticos tentaram reorientar esses sistemas para danificar satélites em órbita, mas não obtiveram sucesso, devido à imprecisão dos sistemas de rastreamento (FEICKERT, 2018, p. 13).

Desde 2018, há informações de que a Rússia vem desenvolvendo AED capaz de destruir sistemas de orientação e navegação em aeronaves tripuladas e não tripuladas e mísseis guiados, com precisão. A Rússia também afirma que esta arma pode interromper os sinais

---

9 O Tratado ABM de 1972, firmado entre os EUA e a antiga União Soviética, codificou a crença de que os limites aos sistemas defensivos capazes de interceptar mísseis balísticos estratégicos – em inglês *Strategic Ballistic Missile* (SBM) – ajudariam, substancialmente, a reduzir a competição de armas nucleares estratégicas e a diminuir o risco de guerra envolvendo armas nucleares (USCSC, 1994, p. 36).

de navegação do Sistema de Posicionamento Global – em inglês *Global Positioning System* (GPS) – e destruir equipamentos de comunicação de rádio e satélites (FEICKERT, 2018, p. 14).

Essa AED, supostamente, pode ser montada em veículos, navios e aeronaves. Além dessas alegações, pouco se sabe, publicamente, sobre tal arma. Relatórios sugerem que a Rússia possui sistemas a laser para defesa de aeronaves e helicópteros e intenciona instalar lasers com maiores capacidades de ataque em suas aeronaves de sexta geração que, provavelmente, não estarão operacionais até o final da década de 2030 (FEICKERT, 2018, p. 14).

As AED representam uma ameaça direta às operações espaciais, e há informações de que a Rússia possui várias bases terrestres com lasers que podem ofuscar sensores de satélite. A Rússia teria implantado o Peresvet, um HEL móvel baseado em terra, com várias unidades móveis de mísseis balísticos intercontinentais (DIA, 2022, p. 28; SAYLER, 2022, p. 18).

Líderes russos indicam que Peresvet possui uma missão antissatélite – em inglês, *Anti-SATellite* (ASAT) – e, embora pouco se saiba, publicamente, sobre o Peresvet, incluindo seu nível de potência, alguns analistas afirmam que tal HEL pode ofuscar satélites e fornecer defesa de ponto para combater UAS (DIA, 2022, p. 28; SAYLER, 2022, p. 18).

Em declarações públicas, o presidente Vladimir Putin chamou o Peresvet de “novo tipo de arma estratégica”. O vice-ministro da Defesa da Rússia, Alexei Krivoruchko, afirmou que estão em andamento esforços para aumentar o nível de poder do Peresvet, e implantá-lo em aeronaves militares. Relatórios sugerem que a Rússia também pode estar desenvolvendo HPM e HEL adicionais capazes de realizar missões ASAT (DIA, 2022, p. 28; SAYLER, 2022, p. 18).

Em dezembro 2019, o ministro da Defesa russo Sergey Shoigu afirmou que o Peresvet foi implantado em cinco divisões estratégicas de mísseis. Em meados da década de 2020, a Rússia, provavelmente, colocará em atividade lasers com maior capacidade de danos a satélites. Assim, em 2030, é possível que a Rússia coloque em atividade sistemas com maior potência, capazes de ampliar a ameaça às estruturas de todos os satélites, e não, apenas, sensores eletro-ópticos de ISR (DIA, 2022, p. 28).

### **2.4.3 China**

O relatório do CRS nº R45098 menciona que o desenvolvimento da tecnologia a laser, por parte dos chineses, remonta ao início dos anos 1960, citando, também, que alguns

especialistas militares chineses acreditam que as AED ganharão maior destaque nas próximas décadas, podendo dominar o campo de batalha em 30 anos (FEICKERT, 2018, p. 14).

O relatório nº R45098 menciona ainda o livro chinês intitulado *Light War or Light Warfare*, publicado pela *People's Liberation Army (PLA) Press*, que enfatiza o conceito conhecido como “Informatização”. Por este conceito, os chineses acreditam que a “próxima fase da guerra” será caracterizada pela combinação de *Big Data* e aumento da autonomia e da inteligência artificial, com a AED no núcleo dessa combinação. Como parte deste conceito, resulta a ênfase em armas a laser autônomas baseadas no espaço. O programa espacial em evolução da China e o trabalho contínuo com lasers aerotransportados sugerem que a China vem buscando, ativamente, a concretização do laser baseado no espaço (FEICKERT, 2018, p. 14).

O relatório nº R45098 de 2018 cita também que, em setembro de 2006, a China, supostamente, usou lasers terrestres para interferir em satélites de vigilância dos EUA. Em 2016, a China teria exibido o seu sistema de defesa a laser de baixa altitude – em inglês *Low-Altitude Laser Defending System (LASS)* – de 30 kW, alegando alcance de 4 quilômetros e capacidade para derrotar enxames de pequenos drones de plástico (FEICKERT, 2018, p. 14).

O relatório também cita que, em 28 de novembro de 2017, o Ministério da Defesa Nacional da China divulgou um vídeo do teste de disparo do que se acredita ser uma nova arma laser de defesa aérea contra sistemas aéreos não tripulados. Acredita-se que a China também esteja desenvolvendo lasers navais, sugerindo que a próxima geração de cruzadores Type-055 poderia, eventualmente, empregar uma arma a laser (FEICKERT, 2018, p. 14).

Outro destaque do relatório nº R45098 é a inferência de que a China vem trabalhando diligentemente para dominar o que entende como a “próxima fase da guerra”, não tanto pelo receio de demonstrar desvantagem defensiva em relação aos EUA, mas sim pela intenção de obter vantagem geoestratégica sobre outras nações (FEICKERT, 2018, p. 15).

O relatório também sugere que qualquer vantagem militar que os EUA possam vir a ter com AED, tal vantagem será, possivelmente, de curta duração, dada a possibilidade de a China já possuir um programa antissatélite a laser baseado no espaço ativo, bem como a possibilidade de a China já possuir armas de HEL e HPM em serviço (FEICKERT, 2018, p. 15).

O relatório R46458 de 2022 cita o entendimento da Comissão de Revisão Econômica e de Segurança EUA-China de que a China vem desenvolvendo AED desde, pelo menos, a década de 1980, com progressos constantes no desenvolvimento de HPM e HEL, cada vez

mais poderosos. O relatório destaca, também, o sistema de ED móvel terrestre de 30 kW, o LW-30, projetado para engajar, com precisão, VANT e armas guiadas (SAYLER, 2022, p. 18).

Pelo relatório CRS nº R46458, documentos indicam que a China também está desenvolvendo um casulo de AED para acoplamento em aeronave, e usou, ou propôs o uso, de AED para interferir em aeronaves militares dos EUA e aliadas, e para interromper a liberdade dos EUA quanto a operações de navegação no Indo-Pacífico (SAYLER, 2022, p. 18).

De acordo com a Agência de Inteligência de Defesa – em inglês, *Defense Intelligence Agency* (DIA) – durante as duas últimas décadas, a pesquisa de Defesa chinesa propôs o desenvolvimento de várias AED para ações reversíveis e não reversíveis no espaço, focadas, portanto, no ofuscamento reversível de sensores eletro-ópticos e, até mesmo, potencialmente destruir componentes de satélite (DIA, 2022, p. 17).

A China possui várias armas a laser terrestres de diferentes níveis de potência para interromper, degradar ou danificar satélites, havendo, atualmente, uma capacidade limitada de empregar sistemas a laser contra sensores de satélite. De meados para o final da década de 2020, a China poderá empregar sistemas com potência mais elevada, estendendo a ameaça às estruturas de satélites não ópticos (DIA, 2022, p. 17).

#### **2.4.4 Israel**

O relatório do CRS nº R45098 de 2018 menciona que as Forças de Defesa de Israel – em inglês *Israel Defense Forces* (IDF) – supostamente empregaram, pela primeira vez, lasers para designação de alvo e telemetria durante a primeira Guerra do Líbano em 1982. Lasers também foram usados para munições guiadas (FEICKERT, 2018, p. 15).

O relatório R45098 cita ainda que o principal programa de laser de Israel – denominado programa Nautilus – teve início em 1996, a partir dos esforços cooperativos de Israel com os EUA para desenvolvimento de um sistema de laser capaz de derrubar foguetes Katyusha, artilharia e morteiros (FEICKERT, 2018, p. 15).

De acordo com Zohuri (2021, p. 23), o sistema do programa Nautilus era referido como HEL tático – do inglês *Tactical High-Energy Laser* (THEL) – havendo, também, o HEL tático móvel – do inglês *Mobile Tactical High-Energy Laser* (MTHL). O sistema utilizaria tecnologias de laser químico de fluoreto de deutério. Em 2000 e 2001, o THEL atingiu 28 foguetes Katyusha e 5 projéteis de artilharia. Em 4 de novembro de 2002, o THEL atingiu um projétil de artilharia.

Ainda de acordo com Zohuri (2021, p. 23), o protótipo da arma tinha, aproximadamente, o tamanho de “seis ônibus urbanos”, composto de módulos que continham um centro de comando, radar e telescópio para rastreamento de alvos, o próprio laser químico, tanques de combustível e reagente, e um espelho giratório para refletir o feixe em direção a alvos de alta velocidade.

O THEL foi descontinuado em 2005 (ZOHURI, 2021, p. 23). Em 2006, quando o Pentágono cancelou o programa, os israelenses iniciaram o programa “Iron Dome”, para emprego de foguetes interceptadores, em vez de lasers, com vistas a derrubar foguetes, artilharia e morteiros (FEICKERT, 2018, p. 15).

De acordo com o relatório do CRS nº R45098 de 2018, Israel alega que o “Iron Dome” teve sucesso em interceptar 90% dos ataques, mas a 100.000 dólares americanos por interceptador, o que é visto por alguns como uma capacidade cara. No início de 2014, Israel, supostamente, iniciou seu programa “Iron Beam”, projetado para usar um laser de elevado kW para destruir foguetes de curto alcance, artilharia, morteiros e UAV. A intenção é empregar o “Iron Beam” com o “Iron Dome” (FEICKERT, 2018, p. 15).

## 2.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA ARMA A LASER A BORDO DE NAVIOS DE SUPERFÍCIE

Na presente seção, serão apresentadas informações extraídas do relatório do CRS nº R44175 (O'ROURKE, 2021, O'ROURKE, 2022). As versões de 2021 e 2022, do referido relatório, possuem o mesmo conteúdo sobre as vantagens e limitações para arma a laser a bordo de navios de superfície. Entretanto, é oportuno mencionar que, na versão de 9 de dezembro de 2021, o relatório R44175 fornece informações para o Congresso dos EUA sobre três programas de P&D da USN para desenvolvimento de novas armas de defesa de ponto a serem embarcadas em navios. Assim, além do SSL, a versão de 2021 apresentou mais dois programas: o canhão eletromagnético – em inglês, *ElectroMagnetic Rail Gun* (EMRG); e o projétil guiado lançado por arma – em inglês, *Gun-Launched Guided Projectile* (GLGP) – também conhecido como projétil de hipervelocidade – em inglês, *HyperVelocity Projectile* (HVP).

Na versão de dezembro de 2021, o relatório R44175 menciona que o orçamento proposto para o ano fiscal de 2022 solicita financiamento de P&D para trabalhar em SSL, mas propõe a suspensão de mais trabalhos nos programas do EMRG e do GLGP, e não solicita

financiamento algum de P&D para o EMRG e o GLGP (O'ROURKE, 2021). Na versão de julho de 2022, o relatório R44175 enfatiza o SSL e menciona que o orçamento proposto para o ano fiscal de 2023 solicita financiamento contínuo de P&D para tal programa (O'ROURKE, 2022). A seguir, serão comentadas as vantagens e limitações mencionadas na seção 2.3.1.

### **2.5.1 Vantagens potenciais**

Além de baixo custo por tiro e ampla capacidade de armazenamento de munição, as demais vantagens potenciais dos sistemas de arma a laser a serem instalados a bordo dos navios constam no apêndice do R44175 (O'ROURKE, 2021, p. 38; O'ROURKE, 2022, p.24).

#### Rápido tempo de engajamento

Um feixe de laser pode atingir um alvo quase instantaneamente, permanecendo focado em um determinado ponto, podendo causar dano incapacitante ao alvo em segundos. Após desabilitar um alvo, o laser pode ser redirecionado, em segundos, para outro alvo.

#### Capacidade de combater mísseis que estejam em manobras radicais

Os dispositivos lasers podem seguir e manter seu feixe sobre mísseis em manobra radical, o que pode não ser conseguido por mísseis superfície-ar da USN.

#### Engajamentos de precisão

Os lasers representam armas de precisão, tendo em vista que o ponto de luz de um laser, que pode ter vários centímetros de diâmetro, afeta o que atinge, evitando que são atingidos, pelo menos não diretamente, objetos próximos ao objeto intencionado.

#### Respostas graduais

Além de destruição de alvos, os lasers podem desempenhar outras funções como detecção e monitoramento de alvos e produção de efeitos não letais, incluindo interferência reversível de sensores eletro-óptico. Ou seja, os lasers oferecem o potencial para respostas graduais, que variam de disparos de alerta a interferência reversível em seus sistemas, causando danos limitados, mas não incapacitantes, ou, até mesmo, danos incapacitantes.

### **2.5.2 Limitações potenciais**

As limitações potenciais dos sistemas de arma a laser a serem instalados a bordo dos navios constam no apêndice do R44175 (O'ROURKE, 2021, p. 38; O'ROURKE, 2022, p.24).



### Linha de visada

Como o feixe de laser tende a se propagar pela atmosfera em um caminho essencialmente reto, os lasers de bordo seriam limitados a engajamentos na linha de visada e, conseqüentemente, não poderiam combater alvos além do horizonte ou alvos obscurecidos por objetos intermediários. Isso limita, em particular, potenciais alcances de engajamento contra pequenas embarcações, que podem ser obscurecidas por ondas de grande elevação, ou engajamento de alvos em baixa altitude de voo. Mesmo assim, os lasers podem adquirir, rapidamente, pequenas embarcações obscurecidas por ondas periódicas.

### Absorção atmosférica, espalhamento e turbulência

Substâncias na atmosfera – particularmente vapor de água, mas também areia, poeira, partículas de sal, fumaça e outros tipos de poluição do ar – absorvem e dispersam o feixe de laser, e a turbulência atmosférica pode desfocar o feixe. Esses efeitos podem reduzir o alcance efetivo de um laser.

A absorção por vapor de água é uma consideração particular para dispositivos laser instalados a bordo de navios de superfície porque os ambientes marinhos apresentam quantidades substanciais de vapor de água no ar. Existem certos comprimentos de onda de luz onde a absorção atmosférica pelo vapor de água é marcadamente reduzida.

Os dispositivos lasers podem ser projetados para emitir feixes nesses pontos ou perto deles, de modo a maximizar sua eficácia potencial. A absorção geralmente cresce com a distância até o alvo, tornando-o, em geral, um problema menor para operações de curto alcance do que para operações de longo alcance.

A óptica adaptativa, que faz ajustes rápidos e precisos em um feixe de laser de forma contínua em resposta à turbulência observada, pode neutralizar os efeitos da turbulência atmosférica. Mesmo assim, os lasers podem não funcionar bem, ou de todo, na chuva ou neblina, impedindo que os lasers sejam uma solução para todos os climas.

### Efeito de lente térmica

Um feixe de laser emitido continuamente na mesma direção, por um determinado período, pode aquecer o ar entorno da trajetória do feixe, podendo desfocar o feixe de laser e, por consequência, reduzir a capacidade de neutralização do alvo. Esse efeito, chamado de lente térmica, pode tornar os lasers menos eficazes contra alvos que estejam se aproximando em uma direção constante. Outros sistemas de defesa de ponto de navios de superfície, como mísseis interceptores ou CIWS, podem ser mais adequados para esse tipo de ameaça. A

maioria dos testes com sistemas a laser foram contra alvos cruzados, em vez de disparos contínuos na mesma direção. O efeito da lente térmica se torna mais preocupante à medida que a potência do feixe de laser aumenta.

#### Ataques de saturação

Como um dispositivo laser pode atacar apenas um alvo por vez, requer vários segundos para desativar o feixe e vários segundos a mais para redirecionar o feixe para o próximo alvo. Assim, um dispositivo laser pode neutralizar apenas alguns alvos em um determinado período, o que limita a capacidade de um laser individual para lidar com ataques de saturação – ataques de várias armas que se aproximam simultaneamente ou com poucos segundos de intervalo. Uma forma de mitigar essa limitação pode ser a instalação de mais de um dispositivo laser a bordo, à semelhança da instalação de vários sistemas CIWS em determinados navios da USN.

#### Alvos resistentes e contramedidas

Lasers menos potentes, isto é, lasers com potências de feixe medidas em quilowatt (kW) em vez de megawatt (MW), podem ter menos eficácia contra alvos que incorporam blindagem, material ablativo ou superfícies altamente reflexivas, ou que giram rapidamente – o ponto do laser não permanece continuamente em um único local na superfície do alvo. Pequenas embarcações, ou outras unidades, podem empregar fumaça ou outras formas de obscurecer com vistas a reduzir sua suscetibilidade ao ataque a laser.

#### Risco de danos colaterais a aeronaves, satélites e visão humana

Considerando que um feixe de laser direcionado para cima que não atingisse o alvo continuaria se propagando para cima em linha reta, tal fato poderia representar risco de danos colaterais indesejados a aeronaves e satélites. O feixe de laser emitido pelos SSL que estão sendo desenvolvidos pela USN possui frequência que pode causar danos permanentes à visão humana, incluindo cegueira. A cegueira pode ocorrer em alcances muito maiores do que os alcances inferidos para danificar os alvos. A dispersão do feixe de laser fora do alvo ou de neblina ou partículas no ar pode representar um risco para os olhos expostos.

### **2.5.3 Custos potenciais e custo-efetividade comparados com outros sistemas**

Os custos potenciais e custo-efetividade comparados com outros sistemas, referentes aos sistemas de arma a laser a serem instalados a bordo dos navios de superfície da

USN, constam no apêndice do relatório R44175. O relatório faz menção a um documento da USN que afirma que os sistemas de armas a laser potencializarão outras armas (cinéticas e não cinéticas) e sensores, bem como o sistema de combate em geral, mas de forma complexa, não sendo fácil valorar a contribuição que ocorrerá para cada sistema individual (O'ROURKE, 2021, p. 40; O'ROURKE, 2022, p.26).

O documento da USN cita a natureza multimissão dos sistemas de armas a laser e a evolução das ameaças, reconhecendo que a USN deve refinar o entendimento dos custos. O documento menciona, ainda, que a USN tem trabalhado para desenvolver estimativas de custos para a aquisição de futuros sistemas, a fim de apoiar as considerações programáticas da Força, citando, também, que a fidelidade do custo a análise para futuras armas a laser é limitada pelos seguintes fatores (O'ROURKE, 2021, p. 40; O'ROURKE, 2022, p.26):

- a) Não há programas anteriores, registrados no DoD dos EUA, voltados para sistemas de armas a laser a serem instalados a bordo de navios, que permitam traçar comparações históricas, particularmente na área de logística e custo do ciclo de vida;
- b) Tecnologias para armas a laser, além do estado da arte atual, ainda estão em desenvolvimento, com financiamento de ciência e tecnologia e atividade orçamentária 4 – em inglês, *Budget Activity 4 (BA 4)* – para P&D;
- c) Além do contrato da USN com a Lockheed Martin, para o Mk 5 Mod 0 HELIOS, não há, na atualidade, outros contratos de aquisição que possam ser usados para comparação de custos;
- d) A base industrial, para os principais subsistemas e componentes para sistemas de armas a laser, ainda não está madura, no que diz respeito à capacidade de produção.

O documento cita ainda que, dadas as ressalvas mencionadas e com base nos dados atuais do HELIOS, o custo por unidade de um laser de 60 kW, com controle de feixe relativamente maduro e integração de sistema de combate a taxas de produção moderadas, será cerca de US\$ 100 milhões, em quantidades limitadas. Para armas com maior potência ou complexidade de controle de feixe, as estimativas são de até US\$ 200 milhões por unidade, para lasers de 250 kW (incluindo laser, diretor de feixe, controle de feixe, gerenciamento de energia

e térmico, integração de sistema de combate e instalação), mas com limites de incerteza significativos, com base em várias suposições (O'ROURKE, 2021, p. 41; O'ROURKE, 2022, p.27).

Considerando o custo de aquisição, os custos dos sistemas de armas cinéticas e não cinéticas são, relativamente, comparáveis aos dos sistemas a laser, variando de US\$ 70 milhões a US\$ 150 milhões. Após a aquisição, os custos para engajamentos por armas a laser são, substancialmente, mais baixos do que qualquer sistema cinético comparável, com estimativas por disparo variando de poucos dólares – cerca de US\$ 1,15 para 60 kW – a, no máximo, algumas dezenas de dólares – em torno de US\$ 9,20 para 480 kW (O'ROURKE, 2021, p. 41; O'ROURKE, 2022, p.27).

À medida que a USN amadurece os sistemas de armas a laser e analisa sua integração ao sistema de combate, as métricas de custo são refinadas, a fim de especificar o retorno adequado do investimento. Dada a incerteza quanto às contribuições relativas dos vários sistemas que são avaliados, bem como a sensibilidade à implementação doutrinária e suposições logísticas, considera-se que ainda é muito cedo para estabelecer um valor significativo que possa ser atribuído, puramente, à implementação de sistemas de armas a laser (O'ROURKE, 2021, p. 41; O'ROURKE, 2022, p.27).

## 2.6 PRINCÍPIOS ÉTICOS DO USO DE ARMAS LASER

O uso de armas a laser levanta muitas dúvidas não só entre cientistas, mas também em entidades jurídicas internacionais, pois, segundo estimativas teóricas, colhidas a partir de dados sobre o conflito no Afeganistão (1979-1989), bem como a primeira Guerra do Golfo (1991), o uso generalizado de armas a laser resultaria na cegueira de 25 a 50% de todas as vítimas humanas. Por um lado, a cegueira é considerada um “mal menor” em relação à morte, porém, esse trauma muda a vida de uma pessoa para sempre, prejudicando, severamente, suas capacidades e liberdades (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 102).

Os rumores, não confirmados, sobre o uso de armas a laser experimentais pela Marinha Britânica, durante o conflito de 1982 nas Malvinas, bem como avanços na tecnologia de armas a laser, levaram a uma série de Convenções da ONU sobre armas convencionais realizadas em 1985 e 1995 (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 103).

A eficácia dessas resoluções foi surpreendente, pois a adoção dessas convenções interrompeu o desenvolvimento e a produção de diversos modelos de armas a laser. Um exemplo marcante é o laser chinês ZM-87, que teve sua produção totalmente interrompida. Muitos desenvolvimentos passaram a ser no sentido de, apenas, provocar cegueira temporária, enquanto alguns outros sistemas foram redefinidos, encontrando uma nova aplicação contra VANT e mísseis anticarro (BERNATSKYI; SOKOLOVSKYI, 2022, p. 103).

As AED não estão, adequadamente, definidas no direito internacional, nem estão, atualmente, na agenda de qualquer mecanismo multilateral existente. Entretanto, certas aplicações de AED são proibidas (SAYLER, 2022, p. 18). Pode ser citado, por exemplo, o art. 1 do Protocolo do Protocolo IV sobre “Armas Cegantes a Laser”, adicional à “Convenção sobre Proibições ou Restrições ao Emprego de Certas Armas Convencionais que podem ser Consideradas Excessivamente Lesivas ou Geradoras de Efeitos Indiscriminados”, que expressa que é proibido o emprego de armas a laser especificamente concebidas para causar cegueira permanente. Essa convenção foi estabelecida pelo Decreto nº 2.739/1998 (BRASIL. PR, 1998).

### 3 DESAFIOS BRASILEIROS NA ÁREA DE FOTÔNICA COM RELAÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DE ARMA DE ENERGIA DIRECIONADA

O presente capítulo apresenta dados obtidos a partir da busca por informações acerca de setores nacionais com alguma infraestrutura ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de tecnologia laser, com a intenção de identificar a possibilidade de contribuição com alguma das fases de um eventual programa nacional de P&D voltado para o desenvolvimento, por ID brasileira, de laser para AED, para o emprego na MB e com proveito para a sociedade. Também são apresentados alguns comentários acerca de desafios identificados para a ID brasileira, no tocante ao desenvolvimento de laser para AED.

Como ponto de partida, é oportuno tecer uma breve menção sobre a abrangência da Fotônica. O APÊNDICE A – Princípios gerais do laser e uma visão geral da Fotônica – apresenta informações adicionais sobre o tema. Tendo uma ampla gama de aplicações científicas e tecnológicas, a Fotônica abrange diversas tecnologias, dentre as quais a tecnologia laser. A Fotônica consta, na ENCTI, como uma tecnologia habilitadora (BRASIL. MCTI, 2018b, p. 114):

As **tecnologias habilitadoras** – nanotecnologia, biotecnologia, **Fotônica**, materiais avançados, manufatura avançada, micro e nanoeletrônica – fornecem a base para a inovação em uma gama de produtos em todos os setores da sociedade. Elas sustentam a transição para uma economia mais digital; são fundamentais para a modernização da base produtiva e melhoria da qualidade de vida da população (BRASIL. MCTI, 2018b, p. 114, grifo nosso).

Devido ao seu caráter estratégico, a Fotônica vem sendo fomentada pelo MCTI, devendo-se destacar que foi publicado, em 2020, no âmbito do MCTI, um mapeamento dos segmentos brasileiros de Fotônica (MASCHERONI *et al.*, 2020), apresentando uma análise sobre organizações nacionais do setor público e privado que lidam com algum processo de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) relacionado à Fotônica.

No contexto das ações de incentivo, por parte do MCTI, para a área de Fotônica, é oportuno mencionar, novamente, as duas portarias voltadas para essa temática que foram publicadas pelo MCTI em 2021, instituindo a IBFóton (BRASIL. MCTI, 2021b), como principal programa estratégico de estímulo à Fotônica no Brasil, e o Sisfóton-MCTI (BRASIL. MCTI, 2021a), como instrumento governamental na área de Fotônica. Tanto a portaria da IBFóton quanto a do Sisfóton citam o setor de Defesa e a tecnologia laser no rol de prioridades.

A Fotônica é estratégica para vários setores industriais e, por consequência, sua evolução impacta a BID. Nesse sentido, no escopo do presente capítulo, importa verificar o cenário atual da BID nacional e sua confluência com as atividades de Fotônica no Brasil. Assim, o presente capítulo está estruturado de acordo com os seguintes tópicos: uma visão geral da BID brasileira; uma visão geral da Fotônica no País; e desafios brasileiros na área de Fotônica.

### 3.1 VISÃO GERAL DA BASE INDUSTRIAL DE DEFESA BRASILEIRA

Na presente seção, serão apresentados comentários de acordo com os seguintes tópicos: importância da BID; credenciamento de ED e EED; e principais setores da BID.

#### 3.1.1 Importância da Base Industrial de Defesa

A manutenção de uma BID nacional constitui um pré-requisito para a Soberania plena, fazendo com que muitos Estados fomentem a aquisição de produtos militares gerados em seus territórios, permitindo, portanto, o surgimento de empresas que atendam tal demanda. Contudo, cumpre destacar que a produção de armamentos, em geral, envolve longos ciclos de desenvolvimento, séries reduzidas e custos de desenvolvimento, resultantes de pesquisa e busca contínua por tecnologias de ponta (BELLAIS, 2018, p. 94; MELO, 2015, p. 40-41).

Com o fim da Guerra Fria, a sustentabilidade de uma ID puramente nacional foi sendo cada vez mais questionada, e a ID passou por mudanças, com a redução do número de empresas na área. No Brasil, a diminuição ocorreu a partir dos anos 1980, em especial, na década de 1990. Entretanto, o custo crescente de sistemas avançados de Defesa, conjugado com a necessidade de autonomia tecnológica, tem motivado a busca do fortalecimento da BID nacional (BELLAIS, 2018, p. 94; ABDI; IPEA, 2016, p. 49).

Dentre as benesses da BID nacional para o País, destacam-se a capacitação voltada para a produção nacional de ativos essenciais para a Defesa, e o alto conteúdo tecnológico dos produtos e serviços gerados, com efeito positivo sobre a economia nacional. De modo geral, As BID geram empregos na área tecnológica, e inovações para a área civil (GALA, 2022).

No que diz respeito às ações governamentais brasileiras já realizadas para o fomento da BID nacional, é oportuno destacar as seguintes (GALA, 2022):

- a) A criação da Política Nacional da Indústria de Defesa (2005);
- b) a inserção do complexo industrial de Defesa como área estratégica no Plano de Ação em CT&I 2007-2011 (2007);
- c) a inclusão do complexo industrial de Defesa nos programas mobilizadores em áreas estratégicas da Política de Desenvolvimento Produtivo (2008);
- d) a criação da SEPROD no MD, responsável pela elaboração de políticas de fomento à BID nacional (2011);
- e) o lançamento do Inova AeroDefesa para apoio a projetos de PD&I conduzidos pela BID nacional, em conjunto ou não, com instituições científico-tecnológicas militares em 2013 (GALA, 2022).

### **3.1.2 Empresas de Defesa e Empresas Estratégicas de Defesa**

O Decreto nº 11.169/2022 (BRASIL. PR, 2022b) – que institui a Política Nacional da Base Industrial de Defesa (PNBID) – apresenta, no inciso II do art. 2º, a definição para a BID (ver Glossário), expressando, no art. 14, que a BID é composta por Empresas de Defesa (ED), por Empresas Estratégicas de Defesa (EED) e por organizações, públicas ou privadas, desenvolvedoras ou produtoras de bens e serviços de Defesa.

Nesse contexto, é oportuno mencionar a Portaria Normativa nº 86/GM-MD/2018 (BRASIL. MD, 2018a) que institui diretrizes para o credenciamento, descredenciamento e avaliação de ED e EED, bem como para a classificação de Produto de Defesa (PRODE) e Produto Estratégico de Defesa (PED). Cumpre destacar, também, a publicação do MD intitulada “Guia de Empresas e Produtos de Defesa: sua Empresa e seu Produto para o Mundo”, que lista as Empresas credenciadas em conformidade com a Lei nº 12.598/2012 (BRASIL. CN, 2012).

De acordo com as informações disponíveis no sítio eletrônico da Associação Brasileira das Indústrias de Materiais de Defesa e Segurança (ABIMDE), verificou-se que, dentre as duzentas e quatro instituições associadas, constam trinta e uma ED e setenta e cinco EED. Verificou-se, também, dentre as associadas, nove órgãos governamentais (ABIMDE, 2022).

Quanto aos nove órgãos governamentais mencionados no sítio eletrônico da ABIMDE, quatro estão classificados como EED, quais sejam: a Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A (AMAZUL); a Empresa Gerencial de Projetos Navais (EMGEPRON); a Indústria de Material Bélico do Brasil (IMBEL); e a Nuclebrás Equipamentos Pesados S. A. (NUCLEP).



Os demais órgãos governamentais associados da ABIMDE são: o Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ); a Fazenda de Aeronáutica de Pirassununga (FAYS); o Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI); o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA); e o Instituto Militar de Engenharia (IME). O QUADRO 1 apresenta os nove órgãos governamentais constantes na lista de associados da ABIMDE, com seus sumários de atividades.

QUADRO 1  
Órgãos governamentais associados à ABIMDE

INSTITUIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
AMAZUL	Engenharia nuclear, projetos navais, submarinos. Tipo: EED.
AMRJ	Manutenção de sistemas de navegação e comunicação.
EMGEPRON	Catálogo, projeto e desenvolvimento de armamento, armamento pesado, construção naval / embarcações, munições pesadas, manutenção de embarcações, projetos navais, sistemas de combate naval, equipamento de Guerra Eletrônica. Tipo: EED.
FAYS	Alimentos, ração operacional, segurança alimentar
IMBEL	P&D de armamento, armamento pesado, armamento leve, arma branca (faca, canivete, espada), munições pesadas, explosivos, abrigos sustentáveis, abrigos temporários. Tipo: EED.
IFI	Cadastramento de empresas e órgãos do setor aeroespacial.
IME	Ensino, treinamento e formação técnica, P&D.
ITA	Ensino, treinamento e formação técnica, P&D.
NUCLEP	Engenharia nuclear. Tipo: EED.

Fonte: ABIMDE, 2022; BRASIL. MD, 2021b, p. 19, 22, 46, 148; BUD, 2022; IFI, 2022.

### 3.1.3 Principais setores da Base Industrial de Defesa Brasileira

A partir da publicação elaborada no âmbito da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), com o título “Diagnóstico: Base Industrial de Defesa Brasileira” (FERREIRA; SARTI, 2011), será apresentada uma sinopse acerca dos principais ramos da BID. As informações da referida publicação foram coletadas sob a coordenação da ABDI e da Secretaria de Ensino, Logística, Mobilização, Ciência e Tecnologia do Ministério da Defesa (SELOM), com apoio de outros órgãos. Embora a referida publicação tenha sido estruturada a partir de dados anteriores a 2011, permite uma visão a contento dos setores da BID.

O diagnóstico da BID elaborado por Ferreira e Sarti (2011) apresenta uma breve análise dos principais setores que compõem a BID brasileira, agrupando as empresas em sete setores (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 20), que serão comentados a seguir.

### Setor 1 – armas e munições leves e explosivos

É representado pelas seguintes organizações: IMBEL – pistolas, fuzis, metralhadoras, explosivos de uso civil e militar; Forjas Taurus S.A. – revólveres, pistolas, carabinas e metralhadoras; Companhia Brasileira de Cartuchos (CBC) – munições leves, armas de caça e esportivas e coletes à prova de bala; e Condor Indústria Química S.A. – tecnologias não letais usadas por instituições de segurança pública e Forças Armadas (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 21).

### Setor 2 – armas e munições pesadas

É representado pelas seguintes organizações: IMBEL – munições pesadas e insumos, granadas para morteiros, propelentes para mísseis e foguetes; EMGEPON – munições pesadas para a MB; CBC – munições para canhões de médio calibre; Britanite S.A. Indústrias Químicas – granadas para morteiros, bombas convencionais e guiadas, foguetes ar-terra lançados por aeronaves; e AVIBRAS – Sistema de Foguetes de Artilharia para Saturação, o Astros II – acrônimo para *Artillery SaTuration ROcket System II* – e foguetes terra-terra e terra-mar multicalibre (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 21; ENAEX, 2022).

### Setor 3 – sistemas eletrônicos e sistemas de Comando e Controle (C2)

Produção de radares e sensores, equipamentos de comunicação e transmissão de dados, terminais de interface homem-máquina e *softwares*. Empresas que desenvolveram radares na década de 2000: Mectron – radar embarcado do avião caça AMX; Orbisat – radar de vigilância aérea de baixa altitude SABER M-60; Omnisys – modernização dos radares de longo alcance da empresa Thales; e Atmos Sistemas (atualmente SAAB Sensores e Serviços do Brasil) – radares meteorológicos (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 22; SAAB, 2020).

### Setor 4 – plataforma naval militar

É representado pelo AMRJ, que produziu grande parte das embarcações militares – como lanchas-patrolha e submarinos da classe Tupi – por meio de projetos próprios, estrangeiros ou adaptados (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 22).

### Setor 5 – plataforma aeroespacial militar

Constitui-se de aeronaves comerciais e executivas da EMBRAER, maior empresa da BID brasileira – aviões turboélices para treinamento militar e ataque leve (EMB-314 Super Tucano), aviões de vigilância eletrônica e programa F-X2 da FAB para aquisição de aviões de caças supersônicos. As empresas nacionais SantosLab e Flight Solutions obtiveram destaque pela produção de VANT leves (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 23-24).

#### Setor 6 – plataforma terrestre militar

É representado pelas empresas Agrale S.A., fabricante do jipe Agrale Marruá e a Iveco Brasil, que produz veículos pesados (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 24-25).

#### Setor 7 – propulsão nuclear

É representado pelo Projeto do Ciclo do Combustível e Projeto de Geração Nucleo-Elétrica, que constituem o Programa Nuclear da Marinha (PNM). Empresas fornecedoras: NitroQuímica – grupo Votorantin, produtos químicos; Alcoa – alumínio; Sactres – forjaria; Villares Metals – aços; NUCLEP – estruturas; Jaraguá – estruturas; Weg – motores elétricos; e Genpro – serviços de engenharia (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 25).

Considerando o assunto abordado no presente trabalho, com foco na identificação da possibilidade de desenvolvimento autóctone de tecnologia laser para AED, destaca-se a inexistência, no diagnóstico da BID elaborado por Ferreira e Sarti (2011), de qualquer menção ao desenvolvimento de tecnologia laser para fins militares. Não obstante o fato de a referida publicação ter sido elaborada com dados anteriores a 2011, reflete alguns aspectos atuais.

Os comentários acerca da existência de segmentos brasileiros com alguma infraestrutura ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento nacional de tecnologia laser serão apresentados na seção 3.2 – visão geral da Fotônica no País – após uma breve abordagem sobre o mercado mundial de Defesa, que será apresentada a seguir.

### **3.1.4 Mercado de Defesa no mundo**

Na presente seção, são apresentados breves comentários sobre o mercado de Defesa estrangeiro, a título de esclarecimento adicional acerca da importância da ID para o crescimento econômico da Nação, e para um olhar abrangente do hiato tecnológico entre o Brasil e os países mais desenvolvidos, no tocante à Defesa.

Uma importante fonte de dados sobre empresas de Defesa, despesas militares e assuntos afins é o Instituto Internacional de Pesquisa para a Paz de Estocolmo – em inglês, *Stockholm International Peace Research Institute* (SIPRI). O SIPRI inclui dados de 173 países desde 1949, e a disponibilidade de dados ao longo do tempo varia, consideravelmente, por país. A maioria dos países tem dados desde, pelo menos, a década de 1960 (SIPRI, 2022b).

A TAB. 1 apresenta informações atinentes a dez empresas produtoras de armas e de serviços militares, considerando dados SIPRI para o ano de 2020. Na TAB. 1, constam valores de vendas de armas, em milhões de dólares, bem como porcentagem de vendas de armas em relação ao total de vendas e tipos de segmentos de mercado de Defesa (SIPRI, 2022c).

TABELA 1  
Dez maiores empresas de Defesa no mundo em 2020

Posição	Empresa	País	Segmentos	Venda de Armas 2020	
				(US\$ milhões)	%
1º	Lockheed Martin Corp.	EUA	Ac, EI, Mi, Sp	58.210	89
2º	Raytheon Technologies	EUA	EI, MI	36.780	65
3º	Boeing	EUA	Ac, EI, Mi, Sp	32.130	55
4º	Northrop Grumman Corp.	EUA	Ac, EI, Mi, Ser, Sh, Sp	30.420	83
5º	General Dynamics Corp.	EUA	A, EI, MV, SA/A, Sh	25.840	68
6º	BAE Systems	Reino Unido	A, Ac, EI, MV, Mi, SA/A, Sh	24.020	97
7º	NORINCO	China	...	17.930	25
8º	AVIC	China	...	16.980	25
9º	CETC	China	...	14.610	43
10º	L3Harris Technologies	EUA	...	14.190	78

Fonte: SIPRI, 2022c; FERREIRA e SARTI, 2011, p. 52.

Abreviaturas dos segmentos: A - artilharia; Ac – aeronave; EI – eletrônico; MI – mísseis; MV - veículos militares; SA/A - armas de pequeno porte e munição; Sh – navios; Sp - espacial.

Pela TAB. 1, observa-se que as empresas estadunidenses e chinesas dominaram boa parte do mercado mundial de armas em 2020, sendo oportuno ressaltar, no tocante à AED, que as empresas Lockheed Martin Corp., Raytheon Technologies Corp., Boeing Company, Northrop Grumman Corp. e BAE Systems são exemplos de empresas que vêm se destacando nesse nicho de mercado (GUREVICH, 2015, p. 92; SAYLER *et al.*, 2021, p. 5 e 7).

A ID é um relevante elemento na estrutura produtiva de economias avançadas, e suas especificidades a diferenciam das demais, notadamente quanto aos PED, sendo oportuno destacar dois aspectos: os fatores estratégicos e geopolíticos predominam sobre os econômicos; e os bens são produzidos para o Estado, único comprador. As peculiaridades da ID prejudicam o desenvolvimento desse segmento, em função do elevado custo dos produtos de Defesa (RANGEL, 2019, p. 14).

Os setores que fornecem o produto – fase final da produção – constituem a estrutura produtiva, enquanto a ID é composta por camadas: a primeira, são as instituições como Universidades, Centros de Pesquisas, Centros de Pensamento – em inglês, *Think Tanks* – e afins; a segunda, o processo produtivo científico e tecnológico; a terceira, a indústria; a quarta, composta pelos setores de serviços; por último, o produto (FREITAS, 2018, p. 59-60).

Segundo Ambros (2017) a hierarquia internacional da produção e comercialização de armamentos compreende a divisão dos produtores em camadas: a primeira, produtores com tecnologia inovadora e domínio na produção militar; a segunda camada produz armamentos de acordo com o mercado, mediante transferência de capacidades industriais e tecnológicas; e a terceira, reproduz tecnologias sem inovação (AMBROS, 2017, p. 53).

Os produtos e serviços variam de armamentos pequenos e suprimentos básicos para as Forças Armadas, a sistemas de armas com tecnologia avançada, abrangendo diversas empresas, que podem depender da demanda estatal. Os principais fornecedores dos EUA fabricam sistemas completos – até a fase final da produção – e a ID é específica; nem todas as empresas são para fins militares, exceto as de uso dual (FREITAS, 2018, p. 60). De acordo com Freitas (2018, p. 66), os países da América do Sul destinam, à Defesa, o orçamento correspondente a uma parcela relativamente baixa do Produto Interno Bruto (PIB).

Em 2016, a ABDI e o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) elaboraram a publicação intitulada “Mapeamento da Base Industrial de Defesa” (ABDI; IPEA, 2016). Consta, nessa publicação, uma tabela baseada no Banco de Dados de Despesas Militares do SIPRI – em inglês, *SIPRI Military Expenditure Database* (ABDI; IPEA, 2016, p. 25).

Os dados da referida tabela (ABDI; IPEA, 2016, p. 25) são atinentes a 2013 e correspondem aos valores despendidos pelas quinze maiores nações em termos de gastos com Defesa, além da África do Sul, inserida no estudo pelo fato de ser um dos países-membros do bloco econômico formado por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul (BRICS).

De acordo com os dados SIPRI, as despesas militares globais aumentaram de 2015 a 2021, totalizando, em 2021, US\$ 2.113 bilhões, superando os US\$ 2 trilhões da primeira vez. Isso representou 2,2% do PIB mundial, equivalente a US\$ 268 por pessoa. Os gastos militares no mundo foram 0,7% maiores do que em 2020 e 12% maior do que em 2012. Essa trajetória ascendente permaneceu inalterada, apesar das flutuações econômicas induzidas pela pandemia de COVID-19 (SIPRI, 2022a, p. 10).

A TAB. 2, uma adaptação da tabela da ABDI e do IPEA (ABDI; IPEA, 2016, p. 25), apresenta dados referentes ao ano de 2021, obtidos do SIPRI (SIPRI, 2022b).

TABELA 2  
Gastos militares de países selecionados (ano de referência 2021)

Posição (em função do valor absoluto)	País	Valor absoluto (US\$ milhões)	% em relação aos gastos do governo	% em relação ao PIB	
		2021	2021	2020	2021
1º	EUA	767.780,1	8,32	3,72	3,48
2º	China	270.016,6	5,03	1,80	1,74
3º	Índia	73.574,7	8,27	2,88	2,66
4º	Rússia	63.485,1	10,79	4,26	4,08
5º	Reino Unido	62.489,3	4,66	2,24	2,22
6º	Japão	55.773,5	2,47	1,03	1,07
7º	Arábia Saudita	53.759,1	20,52	9,22	6,59
8º	França	53.559,6	3,21	2,01	1,95
9º	Alemanha	52.487,7	2,52	1,39	1,34
10º	Coréia do Sul	47.676,3	10,47	2,78	2,78
11º	Itália	30.265,2	2,64	1,53	1,52
12º	Austrália	28.398,2	4,63	2,01	1,98
13º	Canadá	24.001,4	2,74	1,42	1,32
14º	Israel	22.500,8	12,14	5,36	5,17
15º	Brasil	18.746,8	3,28	1,36	1,19
54º	África do Sul	2.803,2	2,34	1,10	0,90

Fonte: ABDI; IPEA, 2016, p. 25; SIPRI, 2022b.

Pela TAB. 2, pode ser observado que o Brasil apresentou o 15º maior dispêndio militar em 2021, bem abaixo dos demais países do BRICS, à exceção da África do Sul. A TAB. 1 mostra que países mais avançados tecnologicamente, principalmente no que tange ao desenvolvimento de laser para emprego militar, apresentam maiores gastos com Defesa, em relação ao Brasil, tanto em valor absoluto quanto em termos de percentual em relação ao PIB.

A necessidade de aumento do orçamento para o setor de Defesa é uma retórica constante em muitos países. Contudo, para uma nação como o Brasil, com território de dimensões continentais, tal questão é um ponto crucial para a preservação da soberania.

Será apresentada, a seguir, uma visão geral acerca da Fotônica no Brasil.

### 3.2 VISÃO GERAL DA FOTÔNICA NO PAÍS

Na presente seção, são apresentados dados obtidos a partir das seguintes fontes: a publicação elaborada pela ABDI, em parceria com o IPEA, com o título “Mapeamento da Base Industrial de Defesa” (ABDI; IPEA, 2016); a publicação do MD intitulada “Catálogo de Laboratórios Dedicados à Pesquisa e ao Desenvolvimento (P&D) das Instituições Científica, Tecnológica e de Inovação (ICT) da Defesa”(BRASIL. MD, 2018b); a publicação elaborada no âmbito do MCTI, intitulada “Mapeamento dos Principais Segmentos do Ecossistema de Fotônica no Brasil” (MASCHERONI *et al.*, 2020); a publicação do MD intitulada “Guia de Empresas e Produtos de Defesa: sua Empresa e seu Produto para o Mundo” (BRASIL. MD, 2021b); e a lista de associados da ABIMDE (ABIMDE, 2022).

A publicação “Mapeamento da Base Industrial de Defesa” apresenta um estudo dividido em oito segmentos: “Armas e Munições Leves e Pesadas e Explosivos”; “Sistemas Eletrônicos e Sistemas de Comando e Controle”; “Plataforma Naval Militar”; “Propulsão Nuclear”; “Plataforma Terrestre Militar”; “Plataforma Aeronáutica Militar”; “Sistemas Espaciais voltados para Defesa”; e “Equipamentos de Uso Individual” (ABDI; IPEA, 2016).

O referido mapeamento da BID menciona a expressão “Arma de Energia Direcionada” uma única vez, ao delimitar o segmento “Armas e Munições Leves e Pesadas e Explosivos” (ABDI; IPEA, 2016, p. 35), citando o conceito de AED constante na publicação “Glossário das Forças Armadas” – MD35-G-01 (BRASIL. MD, 2015, p. 37). Na referida publicação, há poucas citações sobre laser. O termo “HEL” e a expressão “armas com laser” são citados em relação ao grupo alemão Rheinmetall, (ABDI; IPEA, 2016, p. 361, 603 e 732), sem explanação a respeito. No que se refere ao termo “laser”, aparece associado a diversas empresas estrangeiras e não aparece associado a qualquer empresa brasileira.

A publicação elaborada no âmbito do MCTI, sobre segmentos de Fotônica no Brasil, ressalta que o setor de Defesa e Segurança corresponde a um nicho de mercado peculiar, com determinadas especificidades, dentre elas a necessidade de cadastramento junto ao MD, para atendimento às Forças Armadas (MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 60).

A publicação do MCTI menciona, também, que foram identificadas dezenove empresas com sede no Brasil ligadas a produtos para sistemas optrônicos, além de doze empresas estrangeiras que atuam no mercado interno brasileiro com produtos associados à Fotônica para o setor de Defesa e Segurança. Não é citada a expressão “Arma de Energia Direcionada”,

e a expressão “laser de alta energia” aparece uma única vez, para um setor de Odontologia em Porto Alegre – Rio Grande do Sul (MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 60 e 134).

Cumprido destacar, também, a publicação do MD intitulada “Guia de Empresas e Produtos de Defesa: sua Empresa e seu Produto para o Mundo”, que lista as empresas credenciadas em conformidade com a Lei nº 12.598/2012. Na referida publicação, só aparece o termo “laser” na descrição da empresa ARES – Aeroespacial e Defesa S.A, sendo citados dois PED: o telêmetro laser e o designador laser (BRASIL. MD, 2021b, p. 3-5, 237).

No tocante à lista de associados da ABIMDE, não há qualquer informação que remeta ao desenvolvimento de AED, e o termo “laser” só aparece, explicitamente, associado a quatro empresas (ABIMDE, 2022), sem maiores esclarecimentos:

- a) ARES – Aeroespacial e Defesa S.A, empresa brasileira classificada como ED e EED, faz parte do grupo Elbit Systems desde 2010 – origem israelense – sendo mencionados o telêmetro laser e o designador laser;
- b) Safran Eletrônica & Defesa Brasil Ltda., de origem francesa, classificada como ED, sendo mencionado, apenas, o termo “laser”;
- c) Thales International Brasil, origem francesa, menção, apenas, ao termo “laser”;
- d) Hensoldt do Brasil Segurança e Defesa Eletrônica e Óptica Ltda., de origem alemã, sendo mencionado, apenas, o termo “laser”.

### **3.2.1 Laboratórios militares**

Na publicação do MD intitulada “Catálogo de Laboratórios Dedicados à Pesquisa e ao Desenvolvimento (P&D) das Instituições Científica, Tecnológica e de Inovação (ICT) da Defesa”, dentre as instalações citadas como possuidoras de equipamentos baseados em tecnologia laser, destacam-se três organizações com ambientes de pesquisas afins à Fotônica, sendo uma do Exército Brasileiro (EB) e duas no âmbito da Força Aérea Brasileira (FAB). No âmbito do EB, destaca-se o Laboratório de Fotônica (LabFot) do IME. No âmbito da FAB, destacam-se o Instituto de Estudos Avançados (IEAv) e o Laboratório de GE do ITA.

Criado em 1997, o LabFot atende às demandas dos Cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e às pesquisas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Defesa do IME. O LabFot realiza pesquisas nas áreas de Sensores Ópticos e de Comunicações Ópticas, com ênfase em dispositivos ópticos, amplificadores, sistemas e redes de



Multiplexação por Divisão de Comprimento de onda – em inglês, *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) – e sistemas de comunicação Óptica no Espaço Livre – em inglês, *Free Space Optics* (FSO) – dentre outras pesquisas (BRASIL. MD, 2018b, p. 142).

Criado em 1982, o IEAv é pioneiro no uso do laser em aplicações de ciência e engenharia no País. A Divisão de Fotônica do IEAv é constituída pelas Subdivisões de Lasers, de Óptica Aplicada e de Sensores a Fibra Óptica. A Subdivisão de Lasers possui três Laboratórios: Laboratório de Desenvolvimento de Aplicações de Lasers e Óptica, que realiza pesquisa aplicada, desenvolvimento tecnológico e inovação em tratamentos de superfície com lasers, corte e soldagem a laser e manufatura aditiva (impressão 3D); Laboratório de Separação Isotópica a Laser, que atua na separação isotópica a laser de terras-raras; e Laboratório de Tecnologias de Superfícies, que realiza pesquisas que não usam exclusivamente uma fonte laser como ferramenta (IEAv, 2022).

Criado em 2001, o Laboratório de GE do ITA fomenta o ensino e a pesquisa em áreas de interesse da Defesa, incluindo GE, e apoia, com infraestrutura laboratorial, o Curso de Especialização em Ambiente Eletromagnético e o Programa de Pós-Graduação em Aplicações Operacionais. O Laboratório de GE do ITA possui as seguintes linhas de pesquisa (BRASIL. MD, 2018b, p. 291): radiofrequência em Fotônica; emissores e sensores de infravermelho; radar e GE; sonar e Guerra Acústica; Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE); integração de sistemas aviônicos; óptica integrada; simulação e caracterização de sensores de onda acústica de superfície – em inglês, *Surface Acoustic Wave* (SAW).

O QUADRO 2 sumariza as três OM identificadas no catálogo do MD como ambientes de pesquisas afins à Fotônica.

QUADRO 2  
OM do catálogo do MD identificadas como ambientes de pesquisas afins à Fotônica

OM	ATIVIDADES
IME	LabFot – pesquisas para Sensores Ópticos e Comunicações Ópticas (BRASIL. MD, 2018b, p. 142).
IEAv	PD&I em tecnologias Fotônicas no campo aeroespacial (IEAv, 2022).
ITA	LABGE – ensino e pesquisa em áreas de interesse da Defesa (BRASIL. MD, 2018b, p. 291).

Fonte: BRASIL. MD, 2018b, p. 142; 291; IEAv, 2022.

### 3.2.2 Laboratórios integrantes do Sisfóton

O Sisfóton-MCTI é um conjunto de laboratórios ou redes de laboratórios de caráter multiusuários, de acesso aberto a usuários públicos e privados, e direcionados à P&D, à prestação de serviços tecnológicos, ao empreendedorismo e à inovação em Fotônica (MCTI, 2022). Os Laboratórios Integrantes do Sisfóton-MCTI e principais linhas de pesquisa encontram-se resumidos no QUADRO 3.

QUADRO 3  
Laboratórios Integrantes do Sisfóton-MCTI e principais linhas de pesquisa

INSTITUIÇÃO	ATIVIDADES
Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)	Laboratório de Lasers e Aplicações Fotônicas do IPEN: novos Lasers e amplificadores – lasers bombeados por diodo, lasers aleatórios. São Paulo - SP (CPqD, 2022). Incorpora um conjunto de diversos laboratórios do CELAP dedicados a pesquisas nas áreas da saúde, indústria e meio ambiente, além de desenvolvimentos básicos em óptica e lasers.
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)	Laboratório Nacional de Agro-Fotônica (LANAF): análise de insumos, água, sedimentos e alimentos. São Carlos – São Paulo.
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI)	Departamento Regional de Santa Catarina (DR/SC) – Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura e Processamento a Laser: manufatura aditiva e tratamento de superfície. Joinville – Santa Catarina.
Universidade de São Paulo (USP)	Laboratório de Apoio à Inovação e ao Empreendedorismo em Tecnologias Fotônicas: espectroscopia atômica, bioFotônica e nanofabricação com ênfase em sensores. São Carlos – São Paulo.
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)	Laboratório Integrado de Fotônica (LIF): Laser e dispositivos III-V.
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)	Laboratório de Materiais Fotônicos: fabricação de fibras ópticas e colunas capilares de vidro e de plástico; espectroscopia. Araraquara – São Paulo.
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)	Laboratório de Telecomunicações (LabTel): dispositivos fotônicos e sistemas de comunicação.
Universidade Federal de Goiás (UFG)	Rede de Laboratórios Integrados em Fotônica (LIFóton): desenvolvimento de sistemas bionanotecnológicos, síntese de materiais fotônicos e sua caracterização. Goiânia – Goiás.
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)	Laboratório de Óptica e Fotônica (LOFt): bioFotônica, óptica analítica e fotoconversão de energia. Campo Grande – Mato Grosso do Sul.
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)	Rede de Laboratórios de Fotônica da UFPE – FotonNetUFPE: Fotônica não linear, dispositivos fotônicos, sensores ópticos.

Fonte: CPqD, 2022; IPEN, 2022.

O Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) é o Laboratório Integrador do Sisfóton-MCTI, com o papel de promover ações de inteligência

estratégica do Sistema, em conjunto com o MCTI. Participa com o Laboratório de Sensoriamento e Monitoração Óptica (LSMO) e com o Laboratório de Integração Fotônica, em Campinas. Os Laboratórios Gerais são de caráter multiusuário, direcionados à P&D, à prestação de serviços tecnológicos, ao empreendedorismo e à inovação em Fotônica (CPqD, 2022).

Na esfera da CNEN, está o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), que, por meio do Centro de Lasers e Aplicações (CELAP), realiza pesquisas sobre lasers para a área da saúde, processamento de materiais, monitoração ambiental e nuclear (IPEN, 2022).

No âmbito do programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT), está o INCT de Fotônica, isto é, o Instituto Nacional de Fotônica (INFO), formado por 21 instituições: cinco, com grupos de pesquisa consolidados no tema de Fotônica e suas aplicações; cinco, com grupos emergentes – núcleo básico; e onze associadas – contam com um ou dois pesquisadores atuando em subprojetos do INFO em colaboração com grupos consolidados (INFO, 2022).

Na seção a seguir, serão apresentados alguns comentários acerca dos desafios brasileiros na área de fotônica com relação ao desenvolvimento de AED.

### 3.3 DESAFIOS À INDÚSTRIA DE DEFESA BRASILEIRA

A partir das informações obtidas sobre a BID brasileira, o mercado de Defesa no mundo e a Fotônica no País, verificou-se que há lacunas significativas quanto às pesquisas científicas e quanto à cadeia produtiva associada à Fotônica no Brasil, levando-se em conta o atual patamar desse campo do conhecimento em nações mais desenvolvidas, não obstante as recentes ações governamentais de incentivo à Fotônica – IBfóton e Sisfóton-MCTI.

Mais especificamente, quanto à tecnologia laser, constatou-se que há poucas instituições nacionais com alguma infraestrutura ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de laser. Outra constatação, é a inexistência de elementos infraestruturais que permitam a adesão, de forma direta e imediata, a um eventual programa nacional de P&D voltado para o desenvolvimento de laser para AED. Depreende-se, portanto, que há um longo caminho para que a Fotônica brasileira evolua e colabore para a redução da defasagem tecnológica do Brasil em relação aos países tecnologicamente mais avançados.

É oportuno comentar que, no âmbito do MD brasileiro, verificou-se não ser manifesto o debate abordando a Fotônica com aplicações para a Defesa, bem como não é notória

a abordagem do desenvolvimento de laser para fins militares. Constatou-se, portanto, um grande contraste em relação à amplitude do tratamento dado a esse assunto em países com forças armadas tecnologicamente mais avançadas como, por exemplo, os EUA.

Como exemplo que corrobora essa compreensão, destaca-se o “Portfólio de Projetos Estratégicos de Defesa 2020–2031” (PPED 2020–2031) do MD brasileiro, que contém as principais Iniciativas Estratégicas de Defesa (IED) – programas e projetos – norteadas pelos Objetivos Setoriais de Defesa que integram o Planejamento Estratégico Setorial de Defesa (PESD) 2020-2031. No PPED 2020-2031, não há menção ao termo “laser” e não está explícito qualquer processo que remeta ao desenvolvimento de laser para fins militares.

O PPED 2020-2031 é composto por três subportfólios: “Defesa Nacional”; “Cooperação com o Desenvolvimento Nacional”; e “Meio Ambiente, Oceanos e Mares”. No subportfólio “Defesa Nacional” consta, para cada Força Armada, quatro programas. No tocante à MB, são os seguintes: o PNM; o Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB); o Programa Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz); e o Programa de Desenvolvimento de Navios-Patrolha (PRONAPA). Esses programas correspondem às IED no âmbito da Marinha (BRASIL. MD, 2022, p. 5-6). O QUADRO 4 apresenta esses programas da MB.

QUADRO 4  
Programas do PPED no âmbito da MB

PROGRAMA	OBJETIVO
PNM	Obtenção de uma planta nuclear de potência, que será a Planta Nuclear Embarcada (PNE) do Submarino Convencional com Propulsão Nuclear (SCPN). Também serão desenvolvidos o Laboratório de Geração Nucleoelétrica (LABGENE), que é o protótipo em terra da PNE, e a infraestrutura do Ciclo do Combustível (exceto mineração e beneficiamento).
PROSUB	Construção, no País, do primeiro SCPN. Além disso, contribuir para o aprimoramento e inovação da Força de Submarinos da MB, fortalecer o Poder Naval e aumentar a capacidade operacional da MB. No contexto das relações internacionais, contribui para consolidar o Brasil como importante ator no cenário estratégico internacional.
SisGAAz	Monitorar e proteger, continuamente, áreas marítimas de interesse e águas interiores, seus recursos vivos e não vivos, portos, embarcações e infraestruturas, em face de ameaças, emergências, desastres ambientais, hostilidades ou ilegalidades, a fim de contribuir para a segurança e a Defesa da Amazônia Azul e para o desenvolvimento nacional.
PRONAPA	Conjunto de projetos de construção de navios-patrolha, a serem desenvolvidos e construídos em nível nacional, que serão empregados em ações de apoio às atividades afetas, à inspeção naval e na fiscalização de águas interiores, do mar territorial, da Zona Contígua e da Zona Econômica Exclusiva (ZEE), em conformidade com a legislação brasileira.

Fonte: BRASIL. MD, 2022, p. 7, 9, 11, 13.

No contexto das dificuldades para o fortalecimento da BID, cumpre mencionar três desafios para o setor, apontados por Ferreira e Sarti (2011, p. 40):

- a) promoção do desenvolvimento tecnológico do País;
- b) aumento da escala empresarial – produtiva e financeira;
- c) adensamento da cadeia produtiva, ampliando encadeamentos produtivos e tecnológicos.

Assim, no que concerne ao desenvolvimento de laser para aplicações militares, mais especificamente, para o desenvolvimento de laser voltado para AED, além das lacunas de infraestrutura da BID brasileira, constatadas durante a pesquisa, podem ser destacadas as seguintes dificuldades para o fortalecimento da BID, dentre outras apontadas na literatura:

- a) Estado como principal comprador, com o mercado podendo ser classificado como oligopsônio, ou mesmo monopsônio<sup>10</sup> (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 8);
- b) possibilidade de cerceamento tecnológico, por parte dos países desenvolvidos, advindo do controle de exportação de bens sensíveis (LONGO, 2007, p. 124);
- c) dificuldade para recrutamento de mão de obra qualificada, e que seja capaz de manter, a contento, as atividades do setor (ABDI; IPEA, 2016, p. 57);
- d) dificuldades para a busca de mercado externo, principalmente quanto à taxa de câmbio desfavorável, custos portuários e aeroportuários, e barreiras técnicas de potenciais países compradores (ABDI; IPEA, 2016, p. 642);
- e) infraestrutura educacional e de CT&I incompatível com programas de desenvolvimento autóctone de elevada complexidade tecnológica como, por exemplo, um programa de desenvolvimento de AED (FERREIRA; SARTI, 2011, p. 40).

Um programa de P&D nacional voltado para o desenvolvimento de tecnologia laser para AED tem potencial para promover significativas contribuições para a capacidade de pesquisa do País, com reflexos positivos para a BID Nacional e para a sociedade.

Sob essa ótica, serão apresentadas, a seguir, algumas perspectivas para a Fotônica no Brasil, no que diz respeito ao desenvolvimento de tecnologia laser para AED.

---

10 Um monopsônio consiste em um mercado com um único comprador. Quando existem apenas poucos compradores, o mercado é definido como um oligopsônio (OECD, 2002, p. 61).

#### **4 PERSPECTIVAS PARA A FOTÔNICA NO BRASIL QUANTO AO DESENVOLVIMENTO DE ARMA DE ENERGIA DIRECIONADA**

Como já comentado, a Fotônica é considerada, pelo MCTI, estratégica e habilitadora. Nesse contexto, ressalta-se, novamente, o caráter dual da tecnologia laser e a ampla gama de aplicações dessa tecnologia, bem como as perspectivas de uso dessa tecnologia em possíveis conflitos futuros, como apontado em estudos de futuro de outros países.

Em vista disso, cumpre destacar que não é, somente, o setor de Defesa que se beneficia com a evolução tecnológica advinda de um programa de P&D de tecnologia laser para AED. Tal evolução é transbordante, podendo gerar reflexos em vários setores da sociedade, bem como benefícios estratégicos para o País como, por exemplo, a contribuição com estudos do Mar e do Espaço, dimensões que encerram grandes fronteiras de conhecimento.

Dentre as inúmeras contribuições para a Defesa Nacional, que podem advir de um programa autóctone de P&D de tecnologia laser para AED, importa destacar as seguintes:

- a) modernização das Forças Navais, Terrestres e Aéreas brasileiras, contribuindo para que as Forças Armadas nacionais alcancem um nível compatível com a estatura político-estratégica do País;
- b) preservação da Soberania, da Integridade Territorial e de fatores estratégicos para a Nação como segurança alimentar, segurança energética, segurança hídrica, Saúde e TIC.

Assim, é oportuno destacar, como possíveis elementos que concorreriam para a viabilidade de um eventual programa nacional de P&D de tecnologia laser para AED, algumas sugestões elaboradas de acordo as propostas apresentadas no diagnóstico da BID elaborado por Ferreira e Sarti (2011, p. 40), visando a promover a capacitação, expansão, diversificação e fortalecimento da BID brasileira:

- a) instrumentos legais que assegurem recursos de longo prazo necessários para o programa de P&D inferido;
- b) instrumentos que possibilitem a coordenação das atividades envolvendo governo – em especial, organizações do âmbito do MD – academia e indústria;
- c) instrumentos que dificultem, ou impeçam, a desnacionalização ou fechamento das empresas que venham a se envolver com o programa de P&D inferido;

- d) instrumentos legais que assegurem, para as empresas nacionais que venham a se envolver com o programa de P&D inferido, o controle patrimonial, comercial e tecnológico, no caso de alianças estratégicas estabelecidas com empresas estrangeiras.

Corrêa (2021, p. 56-57), ao abordar a relevância da prospecção tecnológica para a guerra do futuro, apresenta algumas recomendações que, a princípio, podem representar possíveis ações que contribuam para a concepção de um eventual programa nacional de P&D voltado para o desenvolvimento, por ID brasileira, de laser para AED, com vistas ao emprego na MB e com proveito para a sociedade. Dentre essas recomendações, destacam-se:

- a) aumento do aporte de recursos financeiros com vistas ao progresso tecnológico no setor de Defesa;
- b) colaboração entre Estados, com o objetivo de promover a transmissão de conhecimento científico e de tecnologia de ponta;
- c) fomento a projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) na área de Defesa, por meio de editais ou outros instrumentos;
- d) parcerias com o setor privado, por meio de modalidades como Consórcio e Sociedade de Propósito Específico, dentre outras, permitindo o compartilhamento de riscos no desenvolvimento de grandes empreendimentos;
- e) identificação de segmentos de PRODE com potencial para inovação de interesse da Defesa;
- f) incentivo à divulgação da importância da inovação e da prospecção tecnológica para o fortalecimento da Defesa e desenvolvimento do País.

É oportuno ressaltar as considerações apresentadas pelos dois profissionais consultados, quais sejam, a profissional da SEPROD, Dra. Fernanda das Graças Corrêa (APÊNDICE B), e o pesquisador do Meio Acadêmico de área afim ao tema – docente da Escola Naval e pesquisador do IME – Prof. Dr. Jesse Werner Costa (APÊNDICE C).

No APÊNDICE B, ao apresentar a sua visão pessoal, a Dra. Fernanda menciona o IEAv com possível colaborador para um eventual programa nacional de P&D voltado para o desenvolvimento, por ID brasileira, de laser para AED. Menciona, também, como possíveis desafios para o desenvolvimento tecnológico inferido, a falta de investimentos e de priorização

em chamadas públicas, bem como de programas estratégicos em pesquisa aplicada e para desenvolvimentos experimentais em tecnologias duais de laser (CORRÊA, 2022).

Como possíveis opções de financiamento para o desenvolvimento tecnológico sugerido, a Dra. Fernanda cita os recursos não reembolsáveis de grandes entidades governamentais. Como possível modelo de política pública, a Dra. Fernanda cita a criação, no âmbito do MD, de uma agência de inovação que demande a elaboração de chamadas públicas e programas estratégicos, recorrendo a instrumentos jurídicos como, por exemplo, a encomenda tecnológica, com foco prioritário no desenvolvimento de tecnologias estratégicas disruptivas duais, promovendo a integração de diversos atores. A Dra. Fernanda destaca, ainda, a importância de envolver, no desenvolvimento tecnológico abordado no presente trabalho, empresas nacionais, permitindo que o conhecimento se mantenha e se consolide no País.

No APÊNDICE C, o Prof. Dr. Jesse, ao abordar a viabilidade do desenvolvimento autóctone de tecnologia laser para AED, ressalta, dentre os requisitos para a pesquisa, a necessidade de profunda compreensão acerca do feixe de alta potência e de como contornar problemas de absorção de energia no meio de propagação (COSTA, 2022).

Como possíveis colaboradores para um eventual programa de desenvolvimento de laser para AED, o Prof. Dr. Jesse destaca o LabFot do IME, o Laboratório de Fotônica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ) e o Laboratório de Ótica do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (UFF), ressaltando a necessidade de investimentos para a capacitação necessária (COSTA, 2022).

Ambos os profissionais consultados acreditam que o desenvolvimento autóctone de tecnologia laser para AED poderia se tornar uma realidade, em função da existência de infraestrutura de pesquisa com potencial para contribuir, bem como a existência de pesquisadores em nível de excelência. Entretanto, os dois profissionais apontam a questão do financiamento como um dos desafios mais relevantes (COSTA, 2022; CORRÊA, 2022).

Com base na literatura consultada e nas abordagens dos profissionais consultados serão apresentadas, a seguir, as considerações finais.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na introdução do presente trabalho, foram descritos os aspectos motivadores, a questão norteadora, os objetivos e a metodologia. Dentre os aspectos motivadores da pesquisa, cumpre destacar: o estímulo ao fortalecimento da BID e à autonomia tecnológica do País; as tendências apontadas na publicação do MD intitulada “Cenário de Defesa 2020-2039”; a importância do setor de CT&I para a BID Nacional; as perspectivas tecnológicas observadas em documentos de outras nações; e a preocupação da USN com a defesa de ponto dos navios para proteção contra VANT, mísseis antinavio e pequenas embarcações.

Ainda quanto aos aspectos motivadores, merecem destaque as tendências apontadas no “Cenário de Defesa 2020-2039”, em especial as seguintes: o incremento de ameaças híbridas no Atlântico Sul; o aumento do crime organizado transnacional; a crescente presença militar estrangeira no Atlântico Sul; a escassez mundial de recursos naturais; e a antevisão pouco favorável para a BID brasileira.

Os capítulos dois, três e quatro foram elaborados com vistas a atender ao objetivo geral e aos objetivos específicos, sendo oportuno retomar o objetivo geral: “analisar os aspectos afetos à possibilidade de desenvolvimento, pela Indústria de Defesa brasileira, de tecnologia laser para AED, com vistas ao emprego em meios da MB e com proveito para a sociedade”.

No capítulo dois, foi apresentado um levantamento de literatura versando sobre desenvolvimento de laser para AED e seu estado da arte, em especial as informações obtidas em documentos disponíveis do Congresso dos EUA. Nesse sentido, cumpre destacar que, dentre os documentos consultados, oito publicações pertencem a órgãos governamentais estadunidenses: duas publicações do Estado-Maior Conjunto; uma publicação do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea; e cinco relatórios do Serviço de Pesquisa do Congresso dos EUA.

Da abordagem elaborada no capítulo dois, importa destacar os seguintes aspectos: a evolução do laser no contexto da Guerra Fria, evidenciando os avanços alcançados pelos EUA e pela então URSS; as vantagens e as limitações da AED a laser a bordo de navios de superfície, mencionadas em relatórios do Congresso dos EUA; a informação de que, pelo menos, 31 nações já possuem AED para missões contra sistemas aéreos não tripulados; e o plano do DoD dos EUA de aumentar os níveis de potência das armas HEL de cerca de 150 kW, atualmente viável, para cerca de 300 kW até o final de 2022, 500 kW até 2024 e 1 MW até 2030.

No capítulo três, foram descritos comentários acerca da existência – e desafios – de segmentos brasileiros com infraestrutura ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de tecnologia laser, e que poderiam contribuir com alguma das fases do desenvolvimento de tecnologia laser para AED. A partir das informações contidas no capítulo três, constatou-se que há lacunas significativas quanto às pesquisas científicas e quanto à cadeia produtiva associada à Fotônica no Brasil, em contraste com as dimensões da abordagem desse assunto em nações mais desenvolvidas.

Dentre as fontes que balizaram o capítulo três, destacam-se seis fontes nacionais: o diagnóstico da BID, elaborado no âmbito da ABDI (FERREIRA; SARTI, 2011); o mapeamento da BID, fruto da parceria entre a ABDI e o IPEA (ABDI; IPEA, 2016); o catálogo de laboratórios dedicados a P&D das ICT da Defesa (BRASIL. MD, 2018b); o mapeamento dos principais segmentos de Fotônica, elaborado no âmbito do MCTI (MASCHERONI *et al.*, 2020); o guia de empresas e PRODE (BRASIL. MD, 2021b); e a lista de associados da ABIMDE (ABIMDE, 2022).

No capítulo quatro, foram apresentados comentários sobre as perspectivas para a Fotônica no Brasil, no que diz respeito ao desenvolvimento de tecnologia laser para AED, com base no conteúdo dos capítulos dois e três, considerando, também, as percepções dos dois profissionais consultados – uma profissional da SEPROD e um professor da Escola Naval e pesquisador do IME.

Assim, retomados alguns elementos que compuseram a pesquisa, com o objetivo de resgatar o contexto e facilitar a visão geral do assunto, e antes de prosseguir com as considerações finais, cumpre reaver a questão norteadora, a fim de ampliar a elucidação dos próximos comentários: “é possível desenvolver, por meio da ID brasileira, tecnologia laser para AED, com vistas ao emprego em meios da MB e com proveito para a sociedade?”. Com o intuito de responder a essa questão, serão apresentadas as considerações a seguir.

A compreensão contemporânea acerca do termo dual, no que se refere a assuntos de Defesa, tem origem no início da Guerra Fria, e muitos países têm ressaltado, em seus documentos governamentais, a importância da busca pelo desenvolvimento de tecnologias com emprego tanto civil quanto militar, e por aquisições que converjam para esse esforço. No tocante ao Brasil, as diretrizes do MD expressam o mesmo entendimento acerca do assunto.

Contudo, destaca-se que, no tocante ao uso dual, países tecnologicamente mais avançados, e com forças armadas relevantes no cenário mundial, apresentam um viés restritivo ante os demais países, na medida em que sustentam o argumento de controle de

exportação de itens de uso dual com o pretexto de combate à proliferação de armas de destruição em massa e ao emprego de itens de uso dual para fins nefastos. Com tal alegação, os países mais desenvolvidos resguardam as exportações de seus produtos e demais interesses de seus governos, acarretando cerceamento tecnológico para os países menos desenvolvidos.

Importa ressaltar, também, que a busca por estratégias orçamentárias voltadas para o desenvolvimento de tecnologias de emprego dual acompanhou a transição entre os séculos XX e XXI em meio a intensas transformações globais, principalmente no contexto tecnológico, econômico e social. Tais transformações, que reverberam até os dias atuais, vieram acompanhadas de benefícios para a humanidade, mas, também, de mazelas e do aumento do uso pernicioso das novas tecnologias, por atores estatais e não estatais.

Sob a visão da significativa influência dos avanços tecnológicos nas transformações sofridas pela humanidade, e como tais transformações se propagam nos ambientes de conflitos armados, o presente trabalho buscou fundamentar a abordagem pretendida, analisando os aspectos relacionados à possibilidade de desenvolvimento, por ID brasileira, de tecnologia laser para AED, com vistas ao emprego em meios da MB e com benefícios para a sociedade.

Com base em uma revisão acadêmica, pautada em documentos ostensivos disponíveis, verificou-se o longo histórico do desenvolvimento de laser, bem como o amplo emprego dessa tecnologia no âmbito civil, com inúmeras aplicações em diversos setores como, por exemplo, comunicações, medicina, indústria e Defesa, dentre outros setores.

No tocante à pesquisa de laser para fins militares, constatou-se expressivo investimento em recursos financeiros e profissionais por parte de grandes potências, em especial os EUA e seus potenciais concorrentes estratégicos, o que explica o elevado nível de desenvolvimento tecnológico alcançado por esses países.

Para além dos aspectos já mencionados, a análise realizada considerou: as diretrizes de alto nível do MD; as aspirações para Marinha do Futuro; as perspectivas observadas em alguns estudos de futuro de outros países; as tendências apresentadas no Cenário de Defesa 2020-2039; o incentivo do MCTI para a área de Fotônica; e as inúmeras aplicações da tecnologia laser, tanto civis quanto militares.

A partir de uma revisão de literatura e de consulta a uma profissional da SEPROD e a um professor da Escola Naval e pesquisador do IME em área afim ao tema, constatou-se que há organizações no País, em setores do governo, da academia e da indústria, contemplando alguma pesquisa sobre laser. Entretanto, apesar das pesquisas conduzidas pelas

instituições identificadas apresentarem nível de maturidade tecnológica potencialmente aderente a um programa de P&D para desenvolvimento de laser voltado para AED, a efetivação de tal programa de desenvolvimento demandaria adequação de infraestrutura para essas instituições, bem como ações preparatórias de grande vulto e programas de P&D de suporte.

Tomando por base a experiência dos países tecnologicamente mais avançados nesse tema, o programa inferido exigiria, no mínimo, um cronograma de longo prazo e grande aporte de recursos financeiros, em função da complexidade do assunto, além da necessidade de articulação de parcerias estratégicas, integrando a indústria, a academia e o governo.

Destaca-se, também, para um programa de desenvolvimento dessa dimensão, a necessidade de rigorosa conformidade com o arcabouço legal e normativo atinente ao assunto, tanto a nível nacional quanto a nível global, em função dos acordos e agendas internacionais. Outro aspecto importante se refere à necessidade de uma adequada administração do conhecimento gerado ao longo do programa, com criteriosa formação de pessoal e qualificação dos profissionais ao longo do projeto, bem como apropriada formação de sucessores.

Confrontando a identificação do atual cenário do País – carente de vários elementos estruturais em relação ao objeto em estudo – com a necessidade de diminuição do hiato tecnológico em relação aos países mais avançados nesse tema, o programa de desenvolvimento tecnológico inferido exigiria um grande esforço inicial de conscientização da sociedade acerca da importância do tema para a Defesa Nacional.

Para aceitação, por parte da sociedade, uma eventual proposta de programa de P&D para desenvolvimento de laser voltado para AED deveria enfatizar, dentre outros aspectos de sua justificativa, o caráter dual da tecnologia laser. A busca pelo emprego dual seria, então, difundida ao longo de todo o programa, estimulando a produção de conhecimento e de processos científico-tecnológicos aplicáveis tanto ao ambiente civil quanto ao militar, em todas as fases do programa e nos diferentes níveis de integração entre os atores envolvidos.

O atual cenário nacional, desfavorável para o desenvolvimento de tal tecnologia, não deve representar uma barreira definitiva. O Brasil possui exemplos de investimentos tecnológicos de longa duração que já produziram resultados positivos. Na história de nosso País, grande empenho de setores importantes possibilitou investimentos em projetos que, quando foram concebidos, estavam fora do horizonte da época, e hoje são frutíferos. Como exemplo, podem ser citadas as pesquisas sobre energia nuclear no Brasil que, tendo como um dos

precursores o Almirante Álvaro Alberto, contabilizam décadas de estudos e já rendem frutos em diversas aplicações para a sociedade.

Não obstante a complexidade do assunto, alguns aspectos podem ser apontados como possíveis norteadores de um planejamento inicial voltado para um programa embrionário de desenvolvimento de laser para AED, representando um primeiro passo significativo na busca da diminuição da defasagem tecnológica em relação aos países mais desenvolvidos.

Além da concepção de um programa com etapas distintas e bem definidas, três aspectos poderiam ser estudados com vistas a compor um traçado inicial, quais sejam: a busca pela interoperabilidade – interação entre MB, EB e FAB; o investimento em pesquisa básica e pesquisa aplicada, para fortalecimento das instituições que já realizam pesquisa com laser e como incentivo a outras organizações; e o delineamento, para as fases iniciais do programa, de ações voltadas para o desenvolvimento de pequenas plataformas de curto alcance.

Em face do exposto, pautado em uma revisão de literatura e informações obtidas junto aos profissionais consultados, constata-se que, no tocante à pesquisa básica e aplicada, existe, no País, potencial para o desenvolvimento tecnológico neste contexto. No entanto, para as demais etapas de desenvolvimento, há necessidade de implantação de infraestrutura adequada. Sendo assim, depreende-se que seria possível a elaboração de um programa nacional de P&D de longo prazo, envolvendo governo, academia e indústria, para a produção autóctone de laser voltado para AED, com vistas ao emprego na MB e com benefícios para a sociedade, mediante adequados investimentos e apropriado planejamento governamental.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL - ABDI; INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Mapeamento da Base Industrial de Defesa**. Brasília, DF: ADBI, IPEA, 2016. 744 p. Disponível em: <[https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/160706\\_livro\\_mapeamento\\_Defesa.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/160706_livro_mapeamento_Defesa.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2022.

AHMED, Syed Affan; MOHSIN, Mujahid; ALI, Syed Muhammad Zubair. Survey and technological analysis of laser and its defense applications. **Defence Technology**, v. 17, n. 2, p 583-592, April 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914719312231>>. Acesso em: 11 fev. 2022.

AIR FORCE RESEARCH LABORATORY – AFRL. **Directed Energy Futures 2060**: Visions for the next 40 years of U.S. Department of Defense Directed Energy technologies. June 2021. Disponível em: <[https://www.afrl.af.mil/Portals/90/Documents/RD/Directed\\_Energy\\_Futures\\_2060\\_Final29June21\\_with\\_clearance\\_number.pdf](https://www.afrl.af.mil/Portals/90/Documents/RD/Directed_Energy_Futures_2060_Final29June21_with_clearance_number.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

AMARANTE, José Carlos Albano do. **A Base Industrial de Defesa Brasileira**. Texto para Discussão 1758. Brasília: DF; Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2012. 42 p. Disponível em: <[https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td\\_1758.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1758.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

AMBROS, C. C. **Base Industrial de Defesa e Arranjos Institucionais**: África do Sul, Austrália e Brasil em Perspectiva Comparada. Orientador: Carlos Schmidt Arturi. 2017. 454 f. Tese (Doutorado em Ciência Política) - Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157043/001017649.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

AMIRI, Iraj Sadegh; AZZUHRI, Saaidal Razalli Bin; JALIL, Muhammad Arif; HAIRI, Haryana Mohd; ALI, Jalil; BUNRUANGSES, Montree; YUPAPIN, Preecha. Introduction to Photonics: Principles and the Most Recent Applications of Microstructures. **Micromachines**, v. 9, n. 9, Sept. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-666X/9/9/452>>. Acesso em 09 ago. 2022.

ANGELL, Aaron. The High-Energy Laser: Tomorrow's Weapon to Improve Force Protection. **National Defense University Press**, [S.l.], n. 64, p. 115-121, 1st. quarter 2012. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA562311>>. Acesso em: 19 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE MATERIAIS DE DEFESA E SEGURANÇA – ABIMDE. **Associadas**. Disponível em: <<https://abimde.org.br/pt-br/associado/associadas/>>. Acesso em: 27 ago. 2022.

AZAM, Mahmud. Wars of 21st Century and the Future of Operational Art and Design. **Army Journal**, [S.l.], n. 65, June 2019. Disponível em: <[https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3585077](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3585077)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BALCÃO ÚNICO DA DEFESA – BUD. **Diretório ABIMDE**. Disponível em: <<https://bud.gov.pt/fls/docs/nli/eventos/ev001/empresas-abimde.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2022.

BARRETO, Eduardo Müssnich. A Proliferação de Armas de Destruição em Massa e a Atividade de Inteligência. **Revista Brasileira de Inteligência**, Brasília: Abin, n. 8, p. 35-46, set. 2013. Disponível em: <<https://rbi.ena.gov.br/index.php/RBI/article/view/104/149>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BELLAIS, Renaud. The Economic Imperative of Europeanizing Defense Innovation. In KARAMPEKIOS, Nikolaos; OIKONOMOU, Iraklis; CARAYANNIS, Elias G. (Ed.). **The Emergence of Eu Defense Research Policy: From Innovation to Militarization**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer, 2018. cap. 6, p. 93-110.

BEREZHNOY, Yuri A. **The Quantum World Of Nuclear Physics**. 1. ed. Singapore: World Scientific. Series on Stability, Vibration and Control of Systems. 2005. 200 p.

BERNATSKYI, Artemii; SOKOLOVSKYI, Mykola, History of military laser technology development in military applications. **History of science and technology**, Kyiv, v. 12, n. 1. May 2022. Disponível em: <<https://hst-journal.com/index.php/hst/article/view/514/387>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

BERTOLOTTI, Mario. **The History of The Laser**. 1. ed. Philadelphia: IOP Publishing Ltd. 2005. 316 p.

BILLING, Daniel C.; FORDY, Graham R.; FRIEDL, Karl E.; HASSELSTRØM; Henriette. The implications of emerging technology on military human performance research priorities. **Journal of Science and Medicine in Sport – JSAMS**, [S.l.], n. 24, p. 947-953, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1440244020307866>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BOWEN, Andrew S. **Russia's War in Ukraine: Military and Intelligence Aspects**. Congressional Research Service. Apr. 27, 2022. 18 p. Relatório. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R47068>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional – CN. Lei n. 9.112 de 10 de outubro de 1995. Dispõe sobre a exportação de bens sensíveis e serviços diretamente vinculados. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 11 out. 1995. Seção 1. p. 16056. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9112.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9112.htm)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional – CN. Lei n. 10.973 de 2 de dezembro de 2004. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 03 dez. 2004. Seção 1. p. 2. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/l10.973.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.973.htm)>. Acesso em: 3 jul. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional – CN. Lei n. 11.196 de 21 de novembro de 2005. Institui o Regime Especial de Tributação para a Plataforma de Exportação de Serviços de Tecnologia da Informação - REPES, o Regime Especial de Aquisição de Bens de Capital para Empresas Exportadoras - RECAP e o Programa de Inclusão Digital; dispõe sobre incentivos fiscais para a inovação tecnológica [...]. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 22 nov. 2005. Seção 1. p. 1. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/l11196.htm#:~:text=II%20%2D%20aplica%2Dse%20a%20estaleiro,pr%C3%A9%2Dregistradas%20ou%20registradas%20no](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11196.htm#:~:text=II%20%2D%20aplica%2Dse%20a%20estaleiro,pr%C3%A9%2Dregistradas%20ou%20registradas%20no)>. Acesso em: 3 jul. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional – CN. Lei n. 12.598 de 21 de março de 2012. Estabelece normas especiais para as compras, as contratações e o desenvolvimento de produtos e de sistemas de defesa; dispõe sobre regras de incentivo à área estratégica de defesa; altera a Lei nº 12.249, de 11 de junho de 2010; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 22 mar. 2012. Seção 1, p. 1. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12598.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12598.htm)>. Acesso em 26 nov. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional – CN. Emenda Constitucional n. 85 de 26 de fevereiro de 2015. Altera e adiciona dispositivos na Constituição Federal para atualizar o tratamento das atividades de ciência, tecnologia e inovação. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 27 fev. 2015. Seção 1, p. 4. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc85.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc85.htm)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Congresso Nacional – CN. Lei n. 13.243 de 11 de janeiro de 2016. Dispõe sobre estímulos ao desenvolvimento científico, à pesquisa, à capacitação científica e tecnológica e à inovação e altera a Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, a Lei nº 6.815, de 19 de agosto de 1980, a Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, a Lei nº 12.462, de 4 de agosto de 2011, a Lei nº 8.745, de 9 de dezembro de 1993, a Lei nº 8.958, de 20 de dezembro de 1994, a Lei nº 8.010, de 29 de março de 1990, a Lei nº 8.032, de 12 de abril de 1990, e a Lei nº 12.772, de 28 de dezembro de 2012, nos termos da Emenda Constitucional nº 85, de 26 de fevereiro de 2015. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Legislativo, Brasília, DF, 12 jan. 2016. Seção 1. p. 1. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2015-2018/2016/Lei/L13243.htm#art2](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Lei/L13243.htm#art2)>. Acesso em: 3 jul. 2022.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**, 1988. Texto constitucional de 5 de outubro de 1988 com as alterações adotadas pelas emendas constitucionais n. 1/1992 a 117/2022 e emendas constitucionais de revisão n. 1 a 6/1994. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha – DGDNTM. **DGDNTM-1202**: Normas para o Sistema de Prospecção Tecnológica da Marinha. Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL. Estado-Maior da Armada – EMA. **EMA-323**: Política Naval. Brasília, 2019.



BRASIL. Estado-Maior da Armada – EMA. **EMA-300**: Plano Estratégico da Marinha (PEM) 2040. Brasília, 2020.

BRASIL. Estado-Maior da Armada – EMA. **EMA-413**: Doutrina de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha. 1ª rev., Brasília, 2021a.

BRASIL. Estado-Maior da Armada – EMA. **EMA-415**: Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil. 1ª rev., Brasília, 2021b.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI. Gabinete do Ministro. Portaria n. 1.405 de 29 de dezembro de 2014. Publica a atualização das Listas de Controle de Exportação de Bens Relacionados a Equipamento, Material e Tecnologia Nuclear e a Equipamento e Material de Uso Duplo e Tecnologia Relacionada, de Aplicação na Área Nuclear. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, DF, 07 jan. 2015. Seção 1. p. 3. Disponível em: <[https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/30169090/do1-2015-01-07-portaria-n-1-405-de-29-de-dezembro-de-2014-30169073](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/30169090/do1-2015-01-07-portaria-n-1-405-de-29-de-dezembro-de-2014-30169073)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTI. Projeto 914BRZ2023, de 12 de junho de 2018. Projeto de Cooperação Técnica entre o Governo Brasileiro e a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura – UNESCO. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, DF, 03 jul. 2018a. Seção 3. p. 5. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/extrato-de-cooperacao-tecnica-28341033>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016/2022**: Sumário Executivo = National Strategy on Science, Technology and Innovation 2016/2022: Executive Summary. Brasília, DF, 2018b. Disponível em: <<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/Publicacoes/ENCTI/PlanosDeAcao.html>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI. **Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação para Tecnologias Convergentes e Habilitadoras, Volume III – Fotônica**. Brasília, 2019, 34 p. Disponível em: <[https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologiasSetoriais/Plano-de-Acao-em-CTI\\_Fotonica\\_20x20cm\\_cor-approvado.pdf](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologiasSetoriais/Plano-de-Acao-em-CTI_Fotonica_20x20cm_cor-approvado.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI. Gabinete do Ministro. Portaria GABMI n. 4.530 de 5 de março de 2021a. Institui o Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (Sisfóton-MCTI). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, DF, 10 mar. 2021. Seção 1. p. 6. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gabmi-n-4.530-de-5-de-marco-de-2021-307491296>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI. Gabinete do Ministro. Portaria GABMI n. 4.532 de 5 de março de 2021b. Institui a Iniciativa Brasileira de Fotônica (IBFóton).

**Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil.** Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, Brasília, DF, 10 mar. 2021. Seção 1. p. 6. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gabmi-n-4.532-de-5-de-marco-de-2021-307491936>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa – MD. **MD35-G-01:** Glossário das Forças Armadas, Brasília, 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/Defesa/pt-br/arquivos/legislacao/emcfa/publicacoes/doutrina/md35-G-01-glossario-das-forcas-armadas-5-ed-2015-com-alteracoes.pdf/view>>. Acesso em 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa – MD. **Cenário de Defesa 2020-2039 - Sumário Executivo.** Brasília: Assessoria Especial de Planejamento, 2017, 64 p. Disponível em: <[https://www.gov.br/Defesa/pt-br/assuntos/copy\\_of\\_estado-e-Defesa/revista\\_cenario\\_de\\_Defesa.pdf](https://www.gov.br/Defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-Defesa/revista_cenario_de_Defesa.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa – MD. Portaria GM-MD n. 86 de 13 de dezembro de 2018. Estabelece procedimentos administrativos para o credenciamento, descredenciamento e avaliação de Empresas de Defesa - ED, Empresas Estratégicas de Defesa - EED e para a classificação e desclassificação de Produtos de Defesa - PRODE, e Produtos Estratégicos de Defesa - PED. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil.** Poder Executivo, Brasília, DF, 17 dezembro 2018a. Seção 1. p. 25-26. Disponível em: <[https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/55442911/do1-2018-12-17-portaria-normativa-n-86-gm-md-de-13-de-dezembro-de-2018-55442698](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/55442911/do1-2018-12-17-portaria-normativa-n-86-gm-md-de-13-de-dezembro-de-2018-55442698)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa – MD. **Catálogo de Laboratórios Dedicados à Pesquisa e ao Desenvolvimento (P&D) das Instituições Científica, Tecnológica e de Inovação (ICT) da Defesa.** 3. ed. [Brasília, DF]: MD, 2018b. 485 p. Disponível em: <[https://www.gov.br/Defesa/pt-br/assuntos/seprod/servicos-e-informacoes/arquivos/Cat\\_Lab\\_3\\_Versao\\_SET2018compactado2.pdf](https://www.gov.br/Defesa/pt-br/assuntos/seprod/servicos-e-informacoes/arquivos/Cat_Lab_3_Versao_SET2018compactado2.pdf)>. Acesso em: 2 jul. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa – MD. **Política Nacional de Defesa,** Brasília, 2020. Encaminhadas, em 22 de julho de 2020, para apreciação do Congresso Nacional. Disponível em: [https://www.gov.br/Defesa/pt-br/assuntos/copy\\_of\\_estado-e-Defesa/pnd\\_end\\_congresso\\_1.pdf](https://www.gov.br/Defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-Defesa/pnd_end_congresso_1.pdf). Acesso em 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa – MD. Portaria GM-MD n. 3.063 de 22 de julho de 2021. Aprova a Política de Ciência, Tecnologia e Inovação de Defesa. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil.** Poder Executivo, Brasília, DF, 26 julho 2021a. Seção 1. p. 16. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm-md-n-3.063-de-22-de-julho-de-2021-334841017>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa – MD. **Guia de Empresas e Produtos de Defesa:** sua Empresa e seu Produto para o Mundo. Brasília, DF: MD, 2021b. 458 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/caslode/pt-br/arquivos/central-de-conteudo/GUIA2021.pdf>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa - MD. Planejamento Estratégico Setorial de Defesa (PESD). **Portfólio de Projetos Estratégicos de Defesa 2020–2031** (PPED 2020–2031). Brasília, DF: MD, 2022. 48 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/Defesa/pt-br/orgaos-vinculados/conselho-superior-de-governanca-do-ministerio-da-Defesa/pped-aprovado-consug-25-07-22.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

BRASIL. Presidência da República – PR. Decreto n. 2.739 de 20 de agosto de 1998. Promulga a Convenção sobre Proibições ou Restrições ao Emprego de Certas Armas Convencionais, que Podem Ser Consideradas como Excessivamente Lesivas ou Geradoras de Efeitos Indiscriminados, conhecida como Convenção sobre Certas Armas Convencionais, adotada em Genebra, em 10 de outubro de 1980. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 21 ago. 1998. Seção 1. p. 2. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=2739&ano=1998&ato=b48QzYU50dNpWT363>> . Acesso em: 22 fev. 2022.

BRASIL. Presidência da República – PR. Decreto n. 3.437 de 25 de abril de 2000. Promulga o Protocolo IV sobre Armas Cegantes a Laser, adicional à Convenção sobre Proibições ou Restrições ao Emprego de Certas Armas Convencionais que podem ser Consideradas Excessivamente Lesivas ou Geradoras de Efeitos Indiscriminados. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 26 abr. 2000. Seção 1. p. 18. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=26/04/2000&jornal=1&pagina=42&totalArquivos=88>>. Acesso em: 22 fev. 2022

BRASIL. Presidência da República – PR. Decreto n. 10.998 de 15 de março de 2022a. Aprova a Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e das Funções de Confiança do Ministério da Defesa, remaneja e transforma cargos em comissão e funções de confiança, e altera o Decreto nº 5.874, de 15 de agosto de 2006. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 16 mar. 2022. Seção 1. p. 9. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10998.htm#art9](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10998.htm#art9)>. Acesso em: 16 jul. 2022.

BRASIL. Presidência da República - PR. Decreto n. 11.169, de 10 de agosto de 2022b. Institui a Política Nacional da Base Industrial de Defesa - PNBID. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 11 agosto 2022. Seção 1. p. 2. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.169-de-10-de-agosto-de-2022-421902614>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

BRESLIN, Ann; MONTWILL, Alex. **Let There Be Light: The Story of Light from Atoms to Galaxies**. 2. ed. London: Imperial College Press. 2013. 552 p.

BUREAU OF INDUSTRY AND SECURITY – BIS. U.S. Department of Commerce. **Where Industry and Security Intersect**, Dual Use Export Licenses, 2022. Disponível em: <<https://www.bis.doc.gov/index.php/all-articles/2-uncategorized/91-dual-use-export-licenses#:~:text=The%20Bureau%20of%20Industry%20and,and%20military%20or%20proliferation%20applications.>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Materiais Avançados no Brasil 2010 - 2022**. Brasília, DF: CGEE, 2010. 360 p. Disponível em: <[https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/Livro\\_Materiais\\_Avançados\\_2010\\_6367.pdf](https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/Livro_Materiais_Avançados_2010_6367.pdf)>. Acesso em: 2 jul. 2022.

COSTA, Jesse Werner. Rio de Janeiro, 10 mai. 2022. Entrevista concedida a Fernando de Oliveira Marin.

CORRÊA, 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. **Rev. Bras. Est. Def.**, Niterói, v. 5, n. 1, p. 193-218, jan./jun. 2018. Disponível em: <https://rbed.abedef.org/rbed/article/download/75053/42072>. Acesso em: 14 ago. 2022.

CORRÊA, F. G. Prospecção Tecnológica & Emprego Militar: Implicações Estratégicas e Recomendações para o Exército Brasileiro. **Análise Estratégica**, Brasília: DF, v. 22, n. 4, p. 51-57, set/nov. 2021. Disponível em: <<http://www.ebrevistas.eb.mil.br/CEExAE/article/view/9306/7998>>. Acesso em: 27 ago. 2022.

CORRÊA, Fernanda das Graças. Brasília: DF, 10 mai. 2022. Entrevista concedida a Fernando de Oliveira Marin.

COURTEILLE, Ph. W. **A practical course in Optical Spectroscopy**. Instituto de Física de São Carlos (IFSC). Universidade de São Paulo (USP), 2021. 223 p. Disponível em: <<https://www.ifsc.usp.br/~strontium/Publication/Scripts/QuantumOpticsLab.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

DEFENSE INTELLIGENCE AGENCY – DIA. **Challenges to Security in Space: Space Reliance in an Era of Competition and Expansion**. DIA, March 2022. Disponível em: <[https://www.dia.mil/Portals/110/Documents/News/Military\\_Power\\_Publications/Challenges\\_Security\\_Space\\_2022.pdf](https://www.dia.mil/Portals/110/Documents/News/Military_Power_Publications/Challenges_Security_Space_2022.pdf)>. Acesso em: 1 set. 2022.

DICKSON, David. Lasers Purify. **Nature**, Washington DC, p. 401, v. 292, July 1981. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/292401b0.pdf>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

EUROPEAN COMMISSION – EC. **Photonics: Components and Subsystems**. In the 6th Framework Programme (2003-2006). Italy, 2008. 84 p. Disponível em: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:020f7c6e-5328-4c82-8b33-76978be76416.0001.03/DOC\\_2&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:020f7c6e-5328-4c82-8b33-76978be76416.0001.03/DOC_2&format=PDF). Acesso em: 9 ago. 2022.

EUROPEAN COMMISSION – EC. **Dual-use trade controls**, 2022. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/trade/import-and-export-rules/export-from-eu/dual-use-controls/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

EUROPEAN UNION – EU. Regulation (EU) 2021/821 of the European Parliament and of the Council of 20 May 2021 setting up a Union regime for the control of exports, brokering, technical assistance, transit and transfer of dual-use items (recast). **Official Journal of the European Union**, L206, v. 64, 2021. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2021:206:FULL&from=EN>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

FEICKERT, Andrew. U.S. Army **Weapons-Related Directed Energy (DE) Programs**: Background and Potential Issues for Congress. Congressional Research Service. Feb. 12, 2018. 30 p. Relatório. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45098>>. Acesso em 22 fev. 2022.

FERREIRA, M. J. B.; SARTI, F. **Diagnóstico**: Base Industrial de Defesa Brasileira. Campinas: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI, 2011. 54 p. Disponível em: <[https://www.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/Relatorios\\_NEIT/Base-Industrial-de-Defesa-Brasileira-Marco-de-2011.pdf](https://www.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/Relatorios_NEIT/Base-Industrial-de-Defesa-Brasileira-Marco-de-2011.pdf)>. Acesso em: 9 jul. 2022.

FIATES, G. G. S.; FIATES, J. E. A.; SERRA, F. A. R.; FERREIRA, M. P. Innovation environment in small technology-based companies. **Journal of Technology Management & Innovation**, Santiago, v. 5, n. 3, p. 81-95, 2010. Disponível em: <<https://scielo.conicyt.cl/pdf/jotmi/v5n3/art06.pdf>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

FREITAS, P. **A indústria de Defesa na Grande Estratégia Brasileira: Integração Regional e Desenvolvimento**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Integração Contemporânea da América Latina) – Instituto Latino-Americano de Estado, Sociedade e Política, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2018. Disponível em: <[https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/4324/FREITAS\\_Patricia\\_282018\\_29-A\\_Industria\\_de\\_Defesa\\_na\\_Grande\\_Estrategia\\_do\\_Brasil-Integracao\\_Regional\\_e\\_Developolvimento..pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/4324/FREITAS_Patricia_282018_29-A_Industria_de_Defesa_na_Grande_Estrategia_do_Brasil-Integracao_Regional_e_Developolvimento..pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 25 jun. 2022.

FUNDAÇÃO CENTRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM TELECOMUNICAÇÕES – CPqD. **Laboratório Integrador**. Disponível em: <<https://www.cpqd.com.br/inovacao/sisfoton/>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

GALA, Paulo. O papel da indústria de Defesa no desenvolvimento econômico do Brasil. **Economia & Finanças**, 03 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.paulogala.com.br/o-papel-da-industria-de-Defesa-no-desenvolvimento-economico-do-brasil/>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

GENTILE, José. **A Transferência de Tecnologia nas Aquisições de Produtos de Defesa**. Trabalho apresentado como requisito de aprovação no Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia (CAEPE), Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2015.

GOH, Gérardine Meishan. **Dispute Settlement in International Space Law**: A Multi-Door Courthouse for Outer Space. Leiden, The Netherlands: Koninklijke Brill. 2007. 424 p.  
GOLDMAN, Leon. **Biomedical Aspects of the Laser**: The Introduction of Laser Applications Into Biology and Medicine. 1. ed. New York: Springer. 1967. 232 p.

GRANSTRAND, Ove; HOLGERSSON, Marcus. Innovation ecosystems: A conceptual review and a new definition. **Technovation**, United Kingdom v. 90-91, p. 1-12, feb./mar. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166497218303870>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

GRUCZA, Bartosz; TOMSZYS, Piotr. The concept of organizational resilience model and adequate measurement mechanism. In: UJWARY-GIL, Anna; GODLEWSKA-DZIOBOŃ, Bianka. **Challenges in Economic Policy, Business and Management in the COVID-19 Era**. Warsaw, Poland: Institute of Economics, Polish Academy of Sciences. 2022. p. 221-244. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/58118958\\_Challenges\\_in\\_Economic\\_Policy\\_Business\\_and\\_Management\\_in\\_the\\_COVID-19\\_Era/link/61f117778d338833e395ee37/download](https://www.researchgate.net/publication/58118958_Challenges_in_Economic_Policy_Business_and_Management_in_the_COVID-19_Era/link/61f117778d338833e395ee37/download)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

GUREVICH, Vladimir. **Cyber and Electromagnetic Threats in Modern Relay Protection**. 1. Ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 2015. 218 p.

HAGLUND, Richard. The Properties of Light. In: TRÄGER, Frank (Ed.), **Springer Handbook of Lasers and Optics**. 1. ed. New York: Springer, 2007. cap. 1, p. 3-29.

HECHT, Jeff; TERESI, Dick. **Laser: Light of a Million Uses**. 1. ed. Mineola, New York: Dover Publications, 1998. 272 p.

INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS – IEAv. **Fotônica**. Disponível em: <<https://ieav.dcta.mil.br/index.php/fotonica>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

INSTITUTO DE FOMENTO E COORDENAÇÃO INDUSTRIAL – IFI. **Desenvolvimento Industrial**. Disponível em: <<https://ifi.dcta.mil.br/index.php/desenvolvimento-industrial>>. Acesso em: 4 jul. 2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES – IPEN. Disponível em: <[https://www.ipen.br/portal\\_por/portal/default.php](https://www.ipen.br/portal_por/portal/default.php)>. Acesso em: 7 ago. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE FOTÔNICA – INFO. **Instituições**. Disponível em: <<http://www.inct.info/pt/#institutions>>. Acesso em: 7 jun. 2022.

INTERNATIONAL INSTITUTE FOR STRATEGIC STUDIES – IISS. **The Military Balance: the annual assessment of the military capabilities and defence economics (2016)**. 1. ed. Londres: Routledge, 2016. 504 p.

JONES, Peter V.; SIDWELL, Keith C. **Aprendendo Latim: textos, gramática, vocabulário e exercícios**. Tradução: Isabella Tardin Cardoso; Paulo Sérgio de Vasconcellos. Revisão geral: Alessandro Rolim de Moura. 2. ed. São Paulo: Odysseus, 2012. 670 p. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4213158/mod\\_resource/content/1/Aprendendo-Latim\\_secao1.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4213158/mod_resource/content/1/Aprendendo-Latim_secao1.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

JUNIOR, F. W. S. S. **Caracterização de laser aleatório em fibras poliméricas produzidas pela técnica de eletrofiação**. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado em Física) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019. Disponível em: <[https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/12672/2/FRANCISCO\\_WELDEM\\_S\\_%20SOUSA\\_JUNIOR.pdf](https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/12672/2/FRANCISCO_WELDEM_S_%20SOUSA_JUNIOR.pdf)>. Acesso em: 17 jul. 2022.

KAISER, Wolfgang. The long journey to the laser and its use for nonlinear optics. In: Karsten König (Ed.), **Multiphoton Microscopy and Fluorescence Lifetime Imaging: Applications in Biology and Medicine**. 1. ed. Berlin: Walter de Gruyter. 2018. cap. 2, p. 17-22. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110429985-004/html>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

KELLER JR, Jack B. History and development of military lasers. In: STUCK, Bruce E.; TEPE, Victoria; NESS, James W. (Ed.). **Biomedical implications of military laser exposure**. Fort Sam Houston, Texas: Borden Institute. 2020. p. 25-48. Disponível em: <<https://medcoe.army.mil/borden-laser>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

KHORRAM-MANESH, Amir; MORTELMANS, Luc J.; ROBINSON, Yohan; BURKLE, Frederick M.; GONIEWICZ, Krzysztof. Civilian-Military Collaboration before and during COVID-19 Pandemic—A Systematic Review and a Pilot Survey among Practitioners. **Sustainability**. v. 14, n. 2, p. 1-27, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/2/624>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

KLEIN, Martin J. Max Planck and the Beginnings of the Quantum Theory. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 1, n. 5, pp. 459-479, Jun. 1962. JSTOR. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/41133222>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

LANA, Raquel Martins; COELHO, Flávio Codeço; GOMES, Marcelo Ferreira da Costa; CRUZ, Oswaldo Gonçalves; BASTOS, Leonardo Soares; VILLELA, Daniel Antunes Maciel; CODEÇO, Cláudia Torres. Emergência do novo coronavírus (SARS-CoV-2) e o papel de uma vigilância nacional em saúde oportuna e efetiva. **Cadernos de Saúde Pública**, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, v. 36, n. 3, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/csp/a/sHYgrSsxqKTZNK6rJVpRxQL/>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

LONGO, Wladimir Pirró e. Tecnologia militar: conceituação, importância e cerceamento. **Tensões Mundiais**, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 111–143, 2007. DOI: 10.33956/tensoesmundiais.v3i5.jul/dez.722. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/tensoesmundiais/article/view/722>. Acesso em: 15 fev. 2022.

LUNA, Salomão Melquiades; ALMEIDA, Nival Nunes de. Perscrutação de uma Plataforma para Prospecção Tecnológica: Demanda da Estratégia Nacional de Defesa para Meios Navais. **Revista Brasileira de Estudos Estratégicos**, v. 8, n. 16, p. 113-135, jul./dez. 2016. Disponível em: <<http://www.rest.uff.br/index.php/rest/article/view/119/103>>. Acesso em: 22 fev. 2022

MCCARTHY, William J. **Directed Energy and Fleet Defense: Implications for Naval Warfare**. Air University Maxwell Air Force Base. May, 2000, 88 p. Relatório. Disponível em: <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA425498.pdf>>. Acesso em 22 fev. 2022.

MAINI, Anil K. **Handbook of Defence Electronics and Optronics: Fundamentals, Technologies and Systems**. 1. ed. Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons Ltd, 2018. 1152 p.

MALLICK, P. K. Advancement of Technology and Future of Warfare. p. 508-527, MCEME Journal, 2005. **ResearchGate**, Oct. 2020. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/344506910\\_ADVANCEMENT\\_OF\\_TECHNOLOGY\\_AND\\_FUTURE\\_OF\\_WARFARE](https://www.researchgate.net/publication/344506910_ADVANCEMENT_OF_TECHNOLOGY_AND_FUTURE_OF_WARFARE)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

MASCHERONI, José Maria; BARBOSA, Ana Maria Navarro; KRETZER, Arthur Raulino. **Mapeamento dos Principais Segmentos do Ecossistema de Fotônica no Brasil**. Brasília: MCTI, 2020. 147 p. Disponível em: <[https://issuu.com/mctic/docs/fotonica\\_mapeamento\\_dos\\_principais\\_segmentos\\_do\\_ec](https://issuu.com/mctic/docs/fotonica_mapeamento_dos_principais_segmentos_do_ec)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

MASON, John W. **The Cold War: 1945-1991**. 1. ed. Londres: Routledge, 1996. 100 p.

MELO, R. **Indústria de Defesa e Desenvolvimento Estratégico: Estudo Comparado França-Brasil**. Brasília, DF: Fundação Alexandre de Gusmão - FUNAG, 2015. 314 p. Disponível em: <[http://funag.gov.br/loja/download/1112\\_Industria\\_de%20Defesa\\_e\\_desenvolvimento\\_estrategico.pdf](http://funag.gov.br/loja/download/1112_Industria_de%20Defesa_e_desenvolvimento_estrategico.pdf)>. Acesso em: 16 jul. 2022.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES – MCTI. **Tecnologias convergentes e habilitadoras – Fotônica**, 2022. Disponível em: <[https://antigo.mctic.gov.br/mctic/open-cms/tecnologia/tecnologias\\_convergentes/fotonica.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/open-cms/tecnologia/tecnologias_convergentes/fotonica.html)>. Acesso em: 19. fev.2022.

MOREIRA, W. S. **Ciência e Poder: O Cerceamento Tecnológico e as Implicações para a Defesa Nacional**. Orientador: Waldimir Pirró e Longo. 2013. 315 f. Tese (Doutorado em Ciência Política) - Instituto de Ciências Humanas e Filosofia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013. Disponível em: <<http://dcp.uff.br/wp-content/uploads/sites/327/2020/10/Tese-de-2013-William-de-Sousa-Moreira.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

OBERING III, Henry “Trey”. Directed Energy Weapons are Real. . . . And Disruptive. **PRISM**, National Defense University, Washington, DC, v. 8, n. 3, p. 37-46, 2019. Disponível em: <[https://ndupress.ndu.edu/Portals/68/Documents/prism/prism\\_8-3/prism\\_8-3\\_Obering\\_36-46.pdf](https://ndupress.ndu.edu/Portals/68/Documents/prism/prism_8-3/prism_8-3_Obering_36-46.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

OLIVEIRA, Marcos Aurélio Guedes de; SOUZA, Deywisson Ronaldo Oliveira de. The technological imperative in Brazil's military modernization. **Revista da Escola de Guerra Naval**, Rio de Janeiro: EGN, v. 24, n. 2, p. 355-377, maio/ago. 2018. Disponível em: <<https://revista.egn.mar.mil.br/index.php/revistadaegn/article/view/707>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

OLIVEIRA, José Cláudio da Costa; ALMEIDA, Nival Nunes de; WADOVSKI, Rodolfo Castelo Branco. Perspectivas Tecnológicas para a Guerra do Futuro: Imaginai-vos a Guerra! **Revista Marítima Brasileira – RMB**, Rio de Janeiro, v. 140, n. 07/09, p. 93-113, jul/set 2020. Disponível em: <[http://www.revistamaritima.com.br/sites/default/files/rmb\\_3t-2020\\_completa.pdf](http://www.revistamaritima.com.br/sites/default/files/rmb_3t-2020_completa.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

OLIVI, Matteo; OLIVI, Giovanni. The Physics of Lasers. In: DIVITO, Enrico; OLIVI, Giovanni; DE MOOR, Roeland. **Lasers in Endodontics: Scientific Background and Clinical Applications**. 1. ed. Springer International Publishing, XXXX. cap. 4, p. 73-82.

OMNÈS, Roland. **The Interpretation of Quantum Mechanics**. 1. ed. New Jersey: Princeton University Press. Princeton Series in Physics. 1994. 550 p.



OPENSTAX. **College Physics**. OpenStax College. Rice University, 2013. 1269 p. Disponível em: <<http://www.wright.edu/~guy.vandegrift/openstaxphysics/other/Entrebook28MB.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. **Glossary of Industrial Organisation Economics and Competition Law**. 2002. Disponível em: <<https://www.oecd.org/regreform/sectors/2376087.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2022.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. **Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation**. 4th ed. Luxembourg: OECD Publishing, Paris/Eurostat, 2018. 258 p. Disponível em: <<https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264304604-en.pdf?expires=1654378319&id=id&acc-name=guest&checksum=9369F128A9C94F8E3A6957EA0F8C0464>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

O'ROURKE, Ronald. **Navy Lasers, Railgun, and Gun-Launched Guided Projectile: Background and Issues for Congress**. Congressional Research Service. Dec. 9, 2021. 42 p. Relatório. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R44175>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

O'ROURKE, Ronald. **Navy Shipboard Lasers for Surface, Air, and Missile Defense: Background and Issues for Congress**. Congressional Research Service. June 12, 2015. 60 p. Relatório. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R41526>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

O'ROURKE, Ronald. **Navy Lasers, Railgun, and Gun-Launched Guided Projectile: Background and Issues for Congress**. Congressional Research Service. Dec. 9, 2021. 42 p. Relatório. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R44175>>. Acesso em: 22 fev 2022.

O'ROURKE, Ronald. **Navy Shipboard Lasers: Background and Issues for Congress**. Congressional Research Service. July 26, 2022. 28 p. Relatório R44175 atualizado. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R44175>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

PAUNOV, Caroline; PLANES-SATORRA, Sandra. Science, technology and innovation in the time of COVID-19. OEDC publishing. **OECD Science, Technology and Industry. Policy Papers**. n. 99, p. 1-67, Feb. 2021. Disponível em: <[https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/science-technology-and-innovation-in-the-time-of-covid-19\\_234a00e5-en;jsessionid=ifFNK0kGmeHTC6YKILz3sN9waRn6dvRagLIU0-hT.ip-10-240-5-70](https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/science-technology-and-innovation-in-the-time-of-covid-19_234a00e5-en;jsessionid=ifFNK0kGmeHTC6YKILz3sN9waRn6dvRagLIU0-hT.ip-10-240-5-70)>. Acesso em: 22 fev 2022.

PAVLOPOULOS, Theodore G. Laser dyes: structure and spectroscopic properties. In: FRREMAN, H. S.; PETERS, A. T. (Ed.), **Colorants for Non-textile Applications**. 1. ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B. V. 2000. cap. 7, p. 275-338.

PEARSALL, Thomas P. **Quantum Photonics**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer. Graduate Texts in Physics. 2017. 292 p.

PERANI, Giulio. **Military technologies and commercial applications: Public policies in NATO countries.** Centro Studi di Politica Internazionale (CeSPI), 1997. 63 p. Relatório.

PEREIRA, L. **Lições da Indústria Fotônica para o Desenvolvimento Tecnológico.** Orientador: Guilherme Ary Plonski. 2008. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3136/tde-18082008-143542/publico/tese\\_revisada\\_completa\\_17\\_6\\_2008.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3136/tde-18082008-143542/publico/tese_revisada_completa_17_6_2008.pdf)>. Acesso em: 9 jul. 2022.

PHOTONICS21. **Market Data and Industry Report 2020.** Dusseldorf: Photonics21, 2020. 132 p. Disponível em: <<https://www.photonics21.org/ppp-services/photronics-downloads.php>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

PINTO, G. P. **Economia da Defesa Naval, Poder Naval e Efeitos dos Investimentos.** Orientador: Gustavo Inácio de Moraes. 2019. 231 f. Tese (Doutorado em Economia do Desenvolvimento) - Escola de Negócios, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <[https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/8740/2/GUILHERME\\_PENHA\\_PINTO\\_TES.pdf](https://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/8740/2/GUILHERME_PENHA_PINTO_TES.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2022.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO - PUC-Rio. Sistema Maxwell. **Breve Histórico do uso de Laser para Perfuração e Canhoneio de Rocha.** Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/37148/37148\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/37148/37148_3.PDF)>. Acesso em: 17 jul. 2022.

RANGEL, A. N.; FERREIRA, K. B.; QUEIROZ, K. R. S. M.; BARRETO, P. L. R.; AMORIM, S. B.; RAMOS, V. R. **Desafios ao Desenvolvimento da Base Industrial de Defesa: A Busca Pela Soberania Nacional.** [S.l.], [2019?]. Disponível em: <[https://www.gov.br/Defesa/pt-br/arquivos/ensino\\_e\\_pesquisa/Defesa\\_academia/cadn/artigos/xvi\\_cadn/desafiosa\\_ao\\_developmentoa\\_daa\\_basea\\_industrial\\_a\\_dea\\_Defesaa\\_aa\\_buscaa\\_pelaa\\_soberaniaa\\_nacional.pdf](https://www.gov.br/Defesa/pt-br/arquivos/ensino_e_pesquisa/Defesa_academia/cadn/artigos/xvi_cadn/desafiosa_ao_developmentoa_daa_basea_industrial_a_dea_Defesaa_aa_buscaa_pelaa_soberaniaa_nacional.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2022.

RANHOLA, M. B. **Armas de Energia Dirigida.** 2014. 70 f. Trabalho de Investigação Individual (Curso de Estado-Maior Conjunto) - Instituto de Estudos Superiores Militares, Pedrouços, 2014. Disponível em: <[https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/10071/1/CTEN\\_Ranhola\\_TII\\_AED\\_vf.pdf](https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/10071/1/CTEN_Ranhola_TII_AED_vf.pdf)>. Acesso em: 17 jul. 2022.

ROSENTAL, Simon. Tecnologias Sensíveis. **Revista da Escola Superior de Guerra**, Rio de Janeiro: ESG, v. 24, n. 50, p. 153-167, jul/dez. 2008.

ROSSITER, Ash. High-Energy Laser Weapons: Overpromising Readiness. **The US Army War College Quarterly, Parameters**, US Army War College (USAWC), Carlisle, PA, v. 48, n 4, p. 33-44, Dec. 2018. Disponível em: <<https://press.armywarcollege.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3010&context=parameters>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

SAAB. **SAAB acquire a empresa brasileira Atmos Sistemas.** 29 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.saab.com/pt-br/markets/brasil/noticias/2020/saab-acquire-a-empresa-brasileira-atmos-sistemas>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

SADRAEY, Mohammad H. **Aircraft Performance: An Engineering Approach**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press. 2017. 570 p.

SAYLER, Kelley M.; FEICKERT, Andrew; HOEHN, John R. O'ROURKE, Ronald. **Department of Defense Directed Energy Weapons: Background and Issues for Congress**. Congressional Research Service. Sept. 28, 2021. 32 p. Relatório. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46925>>. Acesso em: 15 fev. 2022.

SAYLER, Kelley M. **Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress**. Congressional Research Service. Nov. 10, 2021. 33 p. Relatório. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46458>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

SAYLER, Kelley M. **Emerging Military Technologies: Background and Issues for Congress**. Congressional Research Service. Apr. 6, 2022. 34 p. Relatório R46458 atualizado. Disponível em: <<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46458>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

SCHWAB, Klaus. **The Fourth Industrial Revolution**. 1 ed. New York: Currency, 2016. 192 p.

SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, C. H. Infrared and Optical Masers. **Physical Review**, v. 112, n. 6, p. 1940-1949, Dec. 1958. Disponível em: <<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.112.1940>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

SHUKLA, Satvik. Mediation and Propagation of Electromagnetic Waves by Virtual Photons. **International Journal of Research and Analytical Reviews**. v. 8, n. 3, p. 48-50, July 2021. Disponível em: <<https://www.ijrar.org/papers/IJRAR21C1007.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

STOCKHOLM INTERNATIONAL PEACE RESEARCH INSTITUTE – SIPRI. **SIPRI Yearbook 2022: Armaments, Disarmament and International Security: Summary**. [S.l.]: Oxford University Press, 2022a. Disponível em: <[https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-06/yb22\\_summary\\_en\\_v3.pdf](https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-06/yb22_summary_en_v3.pdf)>. Acesso em: 25 jun. 2022.

STOCKHOLM INTERNATIONAL PEACE RESEARCH INSTITUTE – SIPRI. **SIPRI Military Expenditure Database**. 2022b. Disponível em: <<https://milex.sipri.org/sipri>>. Acesso em: 25 jun. 2022.

STOCKHOLM INTERNATIONAL PEACE RESEARCH INSTITUTE – SIPRI. **SIPRI Arms Industry Database**. 2022c. Disponível em: <<https://www.sipri.org/databases/armsindustry>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

STOWSKY, Jay. The Dual-Use Dilemma. **Issues in Science and Technology**. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine and Arizona State University. v. XIII, n. 2, winter 1997. Disponível em: <<https://issues.org/stowsky/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

STRAUSS, Barry. Star War 2.0. Military History in the News. **Hoover Institution**. Stanford University, California, July 6, 2021. Disponível em: <<https://www.hoover.org/research/star-wars-20>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

STRICKLAND, Jeffrey S. **Weird Scientists - the Creators of Quantum Physics**. 1. ed. [S.l.]: Lulu, Inc., 2011. 570 p.

SVELTO, Orazio et. al. Lasers and Coherent Light Sources. In: TRÄGER, Frank (Ed.), **Springer Handbook of Lasers and Optics**. 1. ed. New York: Springer, 2007. cap. 11, p. 583-936.

TALMAR, M. *et al.* Mapping, analyzing and designing innovation ecosystems: The Ecosystem Pie Model. **Longe Range Planning**, Vienna, v. 53, n. 4, p. 1-9, aug. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024630118304667>>. Acesso em: 4 jun. 2022.

TAHVILI, Sahar; HATVANI, Leo. **Artificial Intelligence Methods for Optimization of the Software Testing Process** With Practical Examples and Exercises. 1. ed. London: Elsevier. Series: Uncertainty, Computational Techniques, and Decision Intelligence. 2022, 230 p.

TEIXEIRA, Clarissa Stefani; TRZECIAK, Dorzeli Salete; VARVAKIS, Gregório (Orgs.). **Ecosistema de inovação: alinhamento conceitual**. Florianópolis: Perse, 2017, 24 p. Disponível em: <<http://centrosdeinovacao.sc.gov.br/wp-content/uploads/2020/01/11.Ecosistema-de-inovacao-Alinhamento-Conceitual.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

TEVES, A. C. **Otimização de Acelerômetros MEMS Eletroestáticos de Alto Desempenho**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-01082013-144527/publico/Dissertacao\\_AndreTeves\\_unprotected.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-01082013-144527/publico/Dissertacao_AndreTeves_unprotected.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2022.

TIMBANE, Alexandre António. A formação de palavras a partir de siglas e acrônimos estrangeiros na língua portuguesa. **VERBUM – Cadernos de Pós-Graduação**, São Paulo, n. 6, p. 50-68, 2014. Disponível em: <<https://revistas.pucsp.br/index.php/verbum/article/view/18307/14484>>. Acesso em 22 fev. 2022.

TSIPIS, Kosta. Laser Weapons. **Scientific American**, [S.l.], v. 245, n. 6, p. 51-57, Dec. 1981. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/24964619>>. Acesso em: 9 ago. 2022

TURCHI, L. M. (Org.); MORAIS, J. M. (Org.). **Políticas de Apoio à Inovação Tecnológica no Brasil: Avanços Recentes, Limitações e Propostas de Ações**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2017. 485 p. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/8337/1/Pol%c3%adti-cas%20de%20apoio%20%c3%a0%20inova%c3%a7%c3%a3o%20tecnol%c3%b3gica%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS. INSTITUTO DE MATEMÁTICA. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Matemática. **Curso de Especialização em Matemática, Mídias Digitais e Didática para a Educação Básica**. 2014. Disponível em: <[https://www.ufrgs.br/espmat/disciplinas/geotri2014/modulo6/prob\\_fisica.html](https://www.ufrgs.br/espmat/disciplinas/geotri2014/modulo6/prob_fisica.html)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

UNITED STATES CONGRESS SENATE COMMITTEE – USCSC. **Administration's Proposal to Seek Modification of the 1972 Anti-Ballistic Missile Treaty** (Ex. L, 92-2): Hearings Before the Committee on Foreign Relations, United States Senate, One Hundred Third Congress, Second Session, March 10 and May 3, 1994, Volume 4.

U.S. DEPARTMENT OF HEALTH & HUMAN SERVICES – HHS. **An Analysis of the Russia/Ukraine Conflict**. HHS Cybersecurity Program. 2022. Disponível em: <<https://www.hhs.gov/sites/default/files/an-analysis-of-the-russia-ukraine-conflict.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

VAGUINE, Victor. **Prologue to Super Quantum Mechanics**: Something is Rotten in the State of Quantum Mechanics. 1. ed. Dallas, Texas: ConsReality, Inc. 2012. 152 p. p. 23.

VERGUN, David. Laser Weapons Bring Sharp Advantages to the Battlefield. **U.S. Department of Defense**, 2017. Disponível em: <<https://www.defense.gov/News/News-Stories/Article/Article/1229046/laser-weapons-bring-sharp-advantages-to-the-battlefield/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

WAKABAYASHI, P. S. S. **Desenvolvimento de Novos Materiais Fotoluminescentes Derivados do Benzotiadiazol com Potencial Aplicação em Optoeletrônica**. 2020. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/8977/1/Priscila%20Sakayoko%20Silva%20Wakabayashi.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2022.

WATERMAN, Shaun. Directed Energy Weapons Move Closer to Prime Time. **Joint Intermediate Force Capabilities Office U.S. Department of Defense Non-Lethal Weapons Program**, 2019. Disponível em: <<https://jnlwp.defense.gov/Press-Room/In-The-News/Article/2020551/directed-energy-weapons-move-closer-to-prime-time/>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

WEISS, Richard J. **A Brief History of Light and Those That Lit the Way**. 1. ed. Singapore: World Scientific. 1996. 188 p.

WRIGHT, Timothy. Hypersonic missile proliferation: an emerging european problem? **Non-proliferation and disarmament papers**. EU Non-Proliferation and Disarmament Consortium. n. 80, May 2022. Disponível em: <[https://www.nonproliferation.eu/wp-content/uploads/2022/05/EUNPDC\\_no-80.pdf](https://www.nonproliferation.eu/wp-content/uploads/2022/05/EUNPDC_no-80.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2022.

XU, Guannan; WU, Yuchen; MINSHALL, Tim; ZHOU Yuan. Exploring innovation ecosystems across science, technology, and business: A case of 3D printing in China. **Technological Forecasting and Social Change**, Netherlands, v. 136, p. 208-221, nov. 2018. Disponível em: <[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162517308703#:~:text=The\\_concept\\_of\\_the\\_innovation,knowledge\\_and\\_capture\\_business\\_value](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162517308703#:~:text=The_concept_of_the_innovation,knowledge_and_capture_business_value)>. Acesso em: 5 jun. 2022.

ZOHURI, Bahman. **Thermal Effects of High Power Laser Energy on Materials**. 1. ed. Switzerland: Springer. 2021. 427 p.

## GLOSSÁRIO

**Arma de Energia Direcionada (AED):** Arma dotada de extrema capacidade de potência eletromagnética visando à destruição física dos meios oponentes ou uma redução de sua capacidade de operar, por interferir ou degradar a operação dos sensores inimigos com a geração de fortes campos eletromagnéticos. Pode ser utilizada para desorientar os sensores eletrônicos da plataforma inimiga e, também, contra as pessoas: *lasers* de alta energia; armas de feixe de partículas e micro-ondas de alta potência (BRASIL, 2015, p. 37).

**Base Industrial de Defesa (BID):** conjunto de órgãos e entidades, públicas e privadas, civis e militares, regidas pelo ordenamento jurídico brasileiro, que realizem ou conduzam pesquisas, projetos, desenvolvimento, industrialização, produção, reparo, conservação, revisão, conversão, modernização, manutenção, integração, desativação ou término de bens e serviços de defesa; (BRASIL. MD, 2020, p. 75; BRASIL. PR, 2022b, inciso II, art. 2º).

**Desenvolvimento:** processo global de aperfeiçoamento do homem, do fortalecimento da terra (base fixa da Nação) e do aprimoramento dos sistemas sociais. Processo de especificação, projeto, teste e produção dirigidos ao atendimento de uma necessidade específica. Processo de estudo e trabalho para elaboração das partes de um projeto de produto ou serviço que se pretende construir ou prestar (BRASIL, 2015, p. 88-89).

**Empresa de Defesa:** é toda pessoa jurídica, cadastrada em conformidade com as normas, que produza sistemas ou produtos de Defesa no território nacional ou que integre as cadeias produtivas da Indústria de Defesa (BRASIL. MD, 2021b, p. 7).

**Empresa Estratégica de Defesa (EED):** é toda pessoa jurídica credenciada pelo Ministério da Defesa mediante o atendimento cumulativo das condições dispostas no Inciso IV do Artigo 2º da Lei nº 12.598/2012 (BRASIL. MD, 2021b, p. 7).

**Fotônica:** o campo da ciência que estuda a luz e suas aplicações abordando sua geração, emissão, detecção, transmissão, processamento, modulação e amplificação (MASCHERONI et al., 2020, p. 9).

**Inovação:** introdução de novidade ou aperfeiçoamento no ambiente produtivo e social que resulte em novos produtos, serviços ou processos ou que compreenda a agregação de novas funcionalidades ou características a produto, serviço ou processo já existente que possa resultar em melhorias e em efetivo ganho de qualidade ou desempenho (BRASIL. CN, 2004; BRASIL. CN, 2016).

**Produto de Defesa (PRODE):** equipamentos materiais, serviços e informações que tenham aplicação na área de Defesa. A definição inclui veículos e sistemas completos de qualquer natureza, bem como materiais processados, peças e acessórios para os mesmos (BRASIL. MD, 2015, p. 225). É todo bem, serviço, obra ou informação (inclusive armamentos, munições, meios de transportes e de comunicações, fardamentos e materiais de uso individual e coletivo) utilizado nas atividades finalísticas de Defesa, com exceção de itens de uso administrativo (BRASIL. MD, 2021b, p. 7).

**Produto Estratégico de Defesa (PED):** é todo PRODE de interesse estratégico para a Defesa Nacional, tanto pelo conteúdo tecnológico quanto pela dificuldade de obtenção ou imprescindibilidade (BRASIL. MD, 2021b, p. 7).

**Uso Dual:** produtos de uso civil ou militar (BRASIL. MD, 2020, p. 24).

## APÊNDICE A – PRINCÍPIOS GERAIS DO LASER E UMA VISÃO GERAL DA FOTÔNICA

No presente apêndice, serão apresentadas algumas informações de acordo com os seguintes tópicos: um breve histórico, com o objetivo de apresentar uma visão geral dos primeiros acontecimentos afetos ao desenvolvimento do laser; princípios gerais do laser e alguns conceitos associados à propagação da luz; e uma visão geral sobre a área da Fotônica.

Adicionalmente, serão apresentados alguns conceitos – notadamente, sobre ambiente de inovação e ecossistema de inovação – e comentários relacionados com a publicação intitulada “Mapeamento dos Principais Segmentos do Ecossistema de Fotônica no Brasil” (MASCHERONI *et al.*, 2020), que examina o ecossistema de inovação nos setores de ciência, tecnologia e negócios, tendo, como ponto central, a Fotônica no Brasil.

O breve histórico a seguir (seção A.1) se encontra dividido em dois tópicos: quantização da luz (seção A.1.1), com eventos do século IX mencionados na literatura como contributos para a compreensão do comportamento quântico da luz; e advento do laser (seção A.1.2), com eventos do século XX que contribuíram para o surgimento do laser.

### A.1 BREVE HISTÓRICO

Historicamente, o laser deve ser considerado como resultante das pesquisas realizadas no início da década de 1950 envolvendo amplificadores de micro-ondas. O laser teve sua base teórica derivada da amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação – em inglês, *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Maser). Por algum tempo, o laser foi chamado de “maser óptico” (GOLDMAN, 1967, p. 1).

Contudo, considerando a emissão estimulada como um dos principais conceitos associados ao laser, importa mencionar que, em 1917, Albert Einstein discutiu, pela primeira vez, esse fenômeno, ao considerá-lo em sua derivação estatística da equação de radiação do corpo negro formulada pelo físico alemão Max Planck, além da absorção e a emissão espontânea. Assim, Einstein introduziu a emissão estimulada como mecanismo igualmente importante do sistema atômico e molecular (GOLDMAN, 1967, p. 1; PAVLOPOULOS, 2000, p. 278).

Einstein e Planck, dentre outros cientistas, contribuíram para o surgimento da teoria quântica, sendo oportuno destacar a “hipótese revolucionária” apresentada por Planck,



em 1900, a qual afirmava que energia da radiação eletromagnética se propaga em unidades quantizadas (BRESLIN; MONTWILL, 2013, p. 502; WEISS, 1996, p. 101).

Sendo a compreensão da natureza quântica da luz indispensável para o entendimento dos fenômenos associados ao laser, importa mencionar, na seção a seguir, alguns eventos do século IX que colaboraram para o surgimento da teoria quântica e, em especial, para a evolução do entendimento sobre a natureza quântica da luz.

### A.1.1 Quantização da luz

No final do século XVIII, já estava claro que a teoria corpuscular da luz, defendida por Isaac Newton, embora explicasse alguns fenômenos, confrontava a velocidade da luz experimentalmente medida em materiais. Além disso, em 1808, Malus e Arago haviam demonstrado que a luz possuía uma propriedade – que veio a ser chamada polarização – que não se adequava ao modelo corpuscular proposto por Newton (HAGLUND, 2007, p. 5-6).

Ainda assim, no final do século IX, havia abordagens considerando um mundo físico resumido à matéria e à luz, com a matéria sendo constituída de átomos e a luz correspondendo a uma onda. Dessa forma, algumas abordagens da época consideravam satisfatório, para descrição de um sistema real, calcular as trajetórias de suas partículas elementares, a propagação da luz e a forma como elas interagem. Entretanto, observações experimentais ocorridas no final do século IX como, por exemplo, a divergência ultravioleta da radiação do corpo negro, eram incompatíveis com esses conceitos tradicionais (COURTEILLE, 2021, p.4).

Em 1900, Max Planck, ao explicar a radiação emitida por um corpo negro aquecido, postulou que a energia eletromagnética era emitida de forma quantizada, em múltiplos inteiros de uma unidade elementar de energia – *quantum* – sendo essa energia elementar  $E$  diretamente proporcional à frequência da radiação  $\nu$ , de acordo com a seguinte equação:

$$E = h\nu = h(c/\lambda) \quad , \quad (\text{A.1})$$

onde  $h$  é constante de proporcionalidade (constante de Planck),  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $\lambda$  é o comprimento de onda do *quantum* de energia (VAGUINE, 2012, p. 23).

Em 1905, Einstein utilizou o conceito de quantização de energia de Planck para explicar o efeito fotoelétrico, isto é, a ejeção de elétrons de certos metais quando expostos à

luz (COURTEILLE, 2021, p.4). Destaca-se que o termo fóton, como sinônimo de *quantum* de radiação eletromagnética, foi introduzido por J. Lewis em 1926 (BEREZHNOY, 2005, p. 4).

No QUADRO 5, são mostrados alguns dos eventos do século XIX associados à evolução do entendimento acerca do comportamento quântico da luz, além do ano de 1905, considerado o “ano miraculoso” de Einstein, no qual ele publicou quatro artigos no jornal científico *Annalen der Physik*: o primeiro, abordando o efeito fotoelétrico, o que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física em 1921; o segundo, versando sobre o movimento browniano; o terceiro, sobre a relatividade especial; e o quarto, como consequência da teoria da relatividade especial, desenvolvendo o princípio da equivalência massa-energia (GOH, 2007, p. 1).

QUADRO 5  
Alguns eventos associados à evolução do conceito de quantização da luz

Ano	Pesquisador	Evento
1801	Young	A luz é difratada como uma onda
1860	Maxwell	Teoria unificada da eletrodinâmica, incluindo a luz
1888	Hertz	Detecção de ondas de rádio
~ 1890		Medições precisas do espectro de radiação do corpo negro
1900	Planck	Hipótese quântica: $E = h\nu$
1905	Einstein	Efeito fotoelétrico; a luz se comporta como uma partícula

Fonte: COURTEILLE, 2021, p. 4.

Na seção a seguir, serão apresentados alguns eventos posteriores aos mostrados no QUADRO 5, dando destaque, novamente, à importância da hipótese quântica de Planck, para, em seguida, apresentar eventos do século XX que antecederam o advento do laser.

### A.1.2 Advento do laser

Retornando à hipótese quântica, a fim de enfatizar a ideia de que a emissão de energia ocorre de forma discretizada, isto é, em número finito de elementos de energia, destaca-se que, em 14 de dezembro de 1900, Planck apresentou, à Sociedade Alemã de Física, sua derivação da lei de distribuição da radiação do corpo negro, e o conceito de *quantum* de energia fez sua primeira aparição na Física (BERTOLOTTI, 2005, p. 62; KLEIN, 1962, p. 1).

Em 1917, a ideia de Planck foi usada por Einstein, em uma derivação diferente da mesma radiação de corpo negro, apresentada em um artigo que introduziu o princípio básico

do laser: a emissão estimulada de luz. Durante as décadas seguintes, o processo de emissão de luz estimulada recebeu pouca atenção na comunidade científica. Em alguns trabalhos, a dispersão da luz em gases excitados foi investigada e denominada dispersão negativa. A possibilidade de amplificação da luz não foi reconhecida por 34 anos (KAISER, 2018, p. 17).

Em 1951, finalmente, Charles Townes, professor da Universidade Columbia em Nova York e consultor da empresa Bell Telephone Laboratories, teve a engenhosa ideia de construir um amplificador de micro-ondas (com gás amônia a 1,25 cm) usando o processo de excitação estimulada. Em 1953, o primeiro maser estava em operação (KAISER, 2018, p. 17).

Em 1958, A extensão desejável para frequências mais altas – preferencialmente para o visível – foi discutida teoricamente, pela primeira vez, por Arthur Schawlow e Charles Townes (KAISER, 2018, p. 17): Schawlow e Townes elaboraram um artigo intitulado “Masers infravermelhos e ópticos” – título original em inglês, *Infrared and Optical Masers* – publicado no jornal científico *Physical Review* (SCHAWLOW; TOWNES, 1958). No QUADRO 6, são destacadas a hipótese quântica e algumas contribuições do século XX para o advento do laser.

QUADRO 6  
Algumas contribuições que antecederam o advento do laser

Ano	Pesquisador	Evento
1900	Planck	Hipótese quântica: $E = h\nu$
1917	Einstein	Emissão estimulada
1923	Tolman	Estudos adicionais sobre emissão estimulada
1927	Ladenburg	Estudos adicionais sobre emissão estimulada
1941	Fabrikant	Estudos adicionais sobre emissão estimulada
1951	Townes	Concepção do maser
1952-1955	Townes	Maser em operação
(1955)	Basov	Amplificação de Microondas por Emissão Estimulada
	Prokhorov	Emissão de Radiação
1958	Shawlow	Artigo <i>Infrared and Optical Masers</i> , publicado no Jornal <i>Physical Review</i> (SCHAWLOW, A. L.; TOWNES, 1958)
	Townes	

Fonte: KAISER, 2018, p. 18.

A palavra laser foi introduzida em 1957 por Gordon Gould, sem registro de patente, tendo sido usada, posteriormente, por Theodore Maiman, com o primeiro laser de rubi, em 1960 (OLIVI; OLIVI, 2016, p. 73). De fato, após os estudos de Schawlow e Townes apresentados em 1958, a proposta de estender a ideia do maser para a região do infravermelho ou do visível

do espectro eletromagnético foi realizada em 1960 por Maiman, com a utilização de uma haste de rubi com pontas polidas (SVELTO et al., 2007, p. 584).

## A.2 PRINCÍPIOS GERAIS DO LASER E ALGUNS CONCEITOS

Um dispositivo gerador de laser produz e amplifica um feixe intenso de luz altamente coerente e altamente direcional. Atualmente, dispositivos de laser variam em tamanho, desde lasers semicondutores, tão pequenos quanto um grão de sal, até lasers de estado sólido, tão grandes quanto um prédio de armazenamento (SVELTO et al., 2007, p. 584).

O laser pode ser encontrado em diversos setores e com inúmeras aplicações. Podemos citar, como exemplos: na indústria, para corte e solda de metais e outros materiais; na medicina, para cirurgia; em comunicações ópticas; em metrologia óptica; e em pesquisa científica, dentre tantos outros exemplos. Tal tecnologia é parte integrante, por exemplo, de leitores de código de barras usados em supermercados, de impressoras a laser, e de reprodutores de disco compacto – em inglês, *Compact Disc* (CD) – e de disco versátil digital – em inglês, *Digital Versatile Disc* (DVD) – dentre outros dispositivos (SVELTO et al., 2007, p. 584).

O comprimento de onda do laser é determinado pelas propriedades do meio ativo em que é gerado. Dependendo do tipo de laser e seu regime operacional, a saída pode variar de uma fração de miliwatt (mW) a centenas de quilowatt (kW), em operação de onda contínua, e de dezenas de kW a petawatt (PW) de potência de pico, em operação em modo pulsado. Um laser consiste em, pelo menos, três componentes (SVELTO et al., 2007, p. 584):

- a) um meio ativo que possa amplificar a luz por meio do processo básico de emissão estimulada;
- b) uma fonte de energia;
- c) dois espelhos que formam um ressonador ou cavidade óptica que contém o meio ativo na qual a luz fica presa, propagando-se entre os espelhos.

O feixe de laser é, geralmente, a parte fracionária da luz presa na cavidade que escapa de um dos dois espelhos – o acoplador de saída. O meio ativo pode ser sólido (incluindo semicondutores), líquido ou gás, e a fonte de energia pode ser uma descarga elétrica, uma lâmpada ou outro laser. Outros componentes específicos de um laser variam dependendo do meio ativo, e se o laser é operado continuamente ou pulsado. De fato, os lasers podem ser

divididos em dois grandes grupos: onda contínua – em inglês, *Continuous Wave* (CW) – ou quase CW; e pulsado (SVELTO *et al.*, 2007, p. 584-585).

Um laser CW exhibe um fluxo constante de energia coerente, e sua potência de saída sofre pouca, ou nenhuma, mudança com o tempo. Muitos lasers de gás, como hélio-neônio (HeNe) e íon de argônio (Ar-ion), operam em CW; vários lasers de estado sólido, como lasers de materiais dopados com íon de neodímio ( $\text{Nd}^{3+}$ ) e cristal de safira dopado com titânio ( $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ ) também são operados no modo CW (SVELTO *et al.*, 2007, p. 585).

Nos lasers pulsados, a potência de saída muda com o tempo, de modo a produzir um pulso óptico curto, geralmente de forma repetitiva e com duração de pulso variando, normalmente, de nanossegundos (ns) –  $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$  – a femtossegundos (fs) –  $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ . Exemplos típicos de lasers pulsados abrangem muitos lasers de estado sólido e líquido, como laser de granada de ítrio e alumínio dopada com neodímio – em inglês, *Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet* (Nd:YAG) – e lasers de corante (SVELTO *et al.*, 2007, p. 585).

### A.2.1 Quantum e fóton

Com origem na língua latina, o vocábulo *quantum* (plural *quanta*) significa “quanto”, ou “alguma quantidade” (OMNÈS, 1994, p. 4; JONES; SIDWELL, 2012, p. 23). Na Física, um *quantum* corresponde à quantidade mínima de qualquer ente físico envolvido em uma interação. Por trás disso, encontra-se a noção fundamental de que uma propriedade física pode ser “quantizada”, referida como “hipótese da quantização” (STRICKLAND, 2011, p. 11).

Assim, átomos, moléculas e cargas fundamentais de elétrons e prótons são exemplos de entes físicos que são quantizados, isto é, aparecem apenas em certos valores discretos e múltiplos de uma quantidade básica denominada *quantum*. Por exemplo, não podemos ter uma fração de um átomo, ou parte da carga de um elétron. Portanto, nesse contexto, o termo “quantizado” se opõe ao termo “contínuo” (OPENSTAX, 2013, p. 1030).

Por conseguinte, a Física Quântica lida com pequenos objetos e a quantização de vários entes físicos, incluindo energia e momento angular. Assim como a Física Clássica, a Física Quântica possui vários subcampos, como a mecânica e o estudo das forças eletromagnéticas. O princípio da correspondência afirma que no limite clássico (objetos grandes e lentos), a mecânica quântica se torna a mesma da Física Clássica (OPENSTAX, 2013, p. 1030).

Um fóton corresponde a um *quantum* de radiação eletromagnética (SHUKLA, 2021, p. 48). O nome fóton foi introduzido em 1926, pelo químico americano G. N. Lewis (1875-1946), um dos pais da teoria moderna da valência química (BERTOLOTTI, 2005, p. 102). O fóton corresponde a uma partícula elementar caracterizada por sua frequência e polarização, exibindo um comportamento de onda e de partícula, sendo a unidade de intensidade do campo eletromagnético. Uma vez criado, um fóton é caracterizado por sua energia ( $E$ ), que permanece inalterada até que o fóton seja destruído (PEARSALL, 2017, p. 19).

Dentre as propriedades ondulatórias do fóton, há o comprimento de onda. Enquanto a energia ou frequência é fixa, o comprimento de onda de um fóton pode mudar, dependendo do índice de refração do meio em que se propaga. Os fótons, ao contrário dos elétrons, não interagem entre si, e não trocam energia ou momento (PEARSALL, 2017, p. 19).

## A.2.2 Espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético se estende por uma enorme faixa de frequências e comprimentos de onda, desde vibrações de comprimento de onda de rádio de baixa frequência até radiação gama de energia extremamente alta e comprimento de onda curto (HAGLUND, 2007, p. 7). A radiação laser pertence ao espectro eletromagnético em diferentes zonas, dependendo do comprimento de onda específico produzido (OLIVI; OLIVI, 2016, p. 74).

A FIG. 4 é uma ilustração esquemática do espectro eletromagnético, relacionando comprimentos de onda, frequências e algumas designações comuns de regiões espectrais.

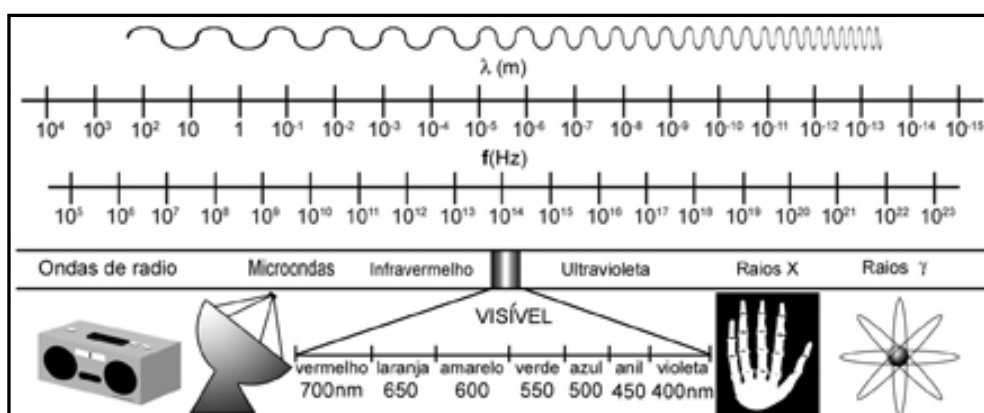


FIGURA 4 - Ilustração esquemática do espectro eletromagnético, relacionando comprimentos de onda, frequências e algumas designações comuns de regiões espectrais.

Fonte: UFRGS. INSTITUTO DE MATEMÁTICA, 2014.

### A.3 FOTÔNICA

A palavra Fotônica foi introduzida em 1967 pelo cientista francês Pierre Aigrain, e se refere a uma área científico-tecnológica diversificada, que reúne, principalmente, conhecimentos de física, nanotecnologia, ciência dos materiais e engenharia elétrica. A Fotônica é multidisciplinar. Desde a primeira demonstração do laser na década de 1960, a Fotônica vem realizando enorme progresso, sendo, atualmente, uma das principais áreas de desenvolvimento tecnológico (EC, 2008, p. 5; CGEE, 2010, p. 67). A Fotônica envolve a geração de luz e sua detecção, bem como sua manipulação via transmissão, emissão, processamento de sinal, modulação, comutação, amplificação e detecção. Assim como a eletrônica revolucionou o século XX, a Fotônica vem fazendo o mesmo no século XXI (AMIRI *et al.*, 2018, p. 2).

O laser é uma tecnologia abarcada pela Fotônica e a importância da Fotônica pode ser vista na multiplicidade de setores de aplicação onde, cada vez mais, atua como impulsionadora de inovação. Assim, a ampla gama de setores em que se observa o emprego do laser pode ser expandida para a Fotônica e, à semelhança do que se constata para o laser, a Fotônica está presente em setores como comunicação, imagem, indústria, ciências da vida, cuidados de saúde e segurança, dentre outros (EC, 2008, p. 5). Na indústria, por exemplo, a Fotônica engloba o emprego de diversos materiais, como os elementos optoeletrônicos, dentre os quais podem ser citados as células fotossensíveis, o diodo emissor de luz – em inglês, *Light-Emitting Diode* (LED) – e o Diodo Orgânico Emissor de Luz – em inglês, *Organic Light Emitting Diodes* (OLED) – dentre outros (WAKABAYASHI, 2020, p. 42).

A palavra Fotônica passou a ser usada, comumente, na década de 1980, quando as operadoras de rede de telecomunicações adotaram a transmissão de dados por fibra óptica. É oportuno mencionar o surgimento, no final do século XVIII, do jornal intitulado *Cartas e Tecnologia Fotônica* – em inglês, *Photonics Technology Letters* – da Sociedade de Lasers e Eletro-Óptica do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos – em inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Lasers and Electro-Optics Society* (AMIRI *et al.*, 2018, p. 3).

Considerando a abordagem da Comissão Europeia sobre a área de Fotônica, traduzida nos trabalhos da Photonics21, uma das plataformas tecnológicas europeias, o QUADRO 7 apresenta uma síntese dos segmentos de mercado e aplicações de Fotônica, com base em classificação sugerida pela Photonics21 e aplicada por Mascheroni *et al.* (2020, p. 10).

QUADRO 7

Segmentos de mercado e aplicações de Fotônica

SEGMENTOS DE MERCADO	APLICAÇÕES
Display	Displays, <i>Liquid Crystal Display</i> - LCD, Displays de plasma, Displays de OLED, Display de vidro e cristal líquido e outros.
Comunicação	Fibras óticas e lasers para transmissão de dados, dentre outras.
Tecnologia da Informação	Câmeras digitais e escâneres, Copiadoras e impressoras óticas-laser, multi-funções, Escâneres de códigos de barras, Câmeras modulares para integração em dispositivos, Sensores de imagem – <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> (CMOS) e <i>Charge Coupled Device</i> (CCD) e outros.
Fotovoltaicos	Células solares e Módulos solares.
Tecnologia Médica e das Ciências da Vida	Lentes para óculos e lentes de contato; sistemas laser para terapia médica e estética; endoscópios; microscópios; visão artificial para aplicações médicas; Oftalmologia e outros sistemas de diagnóstico; sistemas para diagnóstico <i>in-vitro</i> e farmacêuticos; e escâneres galvanométricos, dentre outros.
Iluminação	Lâmpadas; lâmpadas de LED; OLED; conversores para LED e OLED.
Medição e Visão de Máquina	Espectrômetros e módulos espectrométricos; sensores binários; sistemas de medição para semicondutores; sistemas de medição para comunicações óticas; sistemas de medição para outras aplicações.
Tecnologia de Produção	Lasers para processamento de materiais; corte, gravação, solda e texturização; sistemas litográficos; circuito Integrado; monitor de tela plana; <i>mask-lasers</i> para manufatura aditiva; escâneres; e lentes objetivas.
Defesa e Segurança	Sistemas de visão e imagem; sistemas de visão noturna e infravermelho; monitoração e segurança militar; sistemas radar e teleguiados, display para aviônica; sensores de imagem; lasers para Defesa e aeronáutica.
Componentes e Sistemas Ópticos	Lentes; telescópios; prismas.
BioFotônica	Fototerapia; pinça óptica; biologia celular; bioFotônica; microscopia; biópsia óptica; tomografia óptica.

Fonte: MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 10.

#### A.4 FOTÔNICA PARA DEFESA E SEGURANÇA

A Photonics21 destaca, na publicação intitulada *Market Data and Industry Report 2020*, que o cenário militar está em mudança e a Europa enfrenta novas ameaças, como a corrida armamentista por países fora da Europa. Eventos recentes mostraram que o fornecimento de alguns componentes de alta tecnologia não é garantido, principalmente devido às regras de exportação aplicadas pelos estados aliados. A capacidade de desenvolver e fabricar essas tecnologias Fotônicas é uma questão estratégica (PHOTONICS21, 2020, p. 23).

A Fotônica é essencial para o setor de Defesa, constituindo um recurso estratégico. Vários equipamentos avançados operam com, pelo menos, um módulo fotônico. Podem ser citados, como exemplos, dispositivos de análise para ameaça Nuclear, Biológica, Química e



Radiológica (NBQR) – em inglês, *Nuclear, Radiological, Biological or Chemical* (NRBC) – monitores de Alertas, câmeras de imagem avançada em satélites ou drones, *Light Detection and Ranging* (LIDAR), telêmetros e sensores inerciais, dentre outros (PHOTONICS21, 2020, p. 23).

Considerando a Fotônica para o setor de Defesa e Segurança no âmbito da Europa, os principais países produtores são a França e o Reino Unido (responsáveis por uma quota combinada de 52% da produção europeia), seguidos pela Itália, Alemanha e Suécia. Com sede na França, a Thales é a maior produtora de Fotônica para o setor de Defesa e Segurança. Suas plantas de produção estão localizadas principalmente na França e no Reino Unido. A Safran também é uma importante produtora nesse setor. No tocante à vigilância por vídeo, a Bosch Security Systems é a líder do segmento. No QUADRO 8 são mostrados os subssegmentos do segmento Defesa e Segurança, de acordo com a Photonics21 (PHOTONICS21, 2020, p. 97).

QUADRO 8  
Subsegmentos de mercado de Fotônica para o setor de Defesa e Segurança

SUBSEGMENTOS	PRODUTOS
Imagem por infravermelho, medição e visão noturna	Câmeras e sistemas para visão diurna e noturna (aplicações ar-terra-mar) Telemetria, vibrometria laser, contramedidas, medidas NBQR
Displays	Displays aviônicos e <i>Head-up Displays</i> para aplicações em Defesa e segurança Detecção de segurança de Raio-X Câmeras para segurança e vigilância com vídeo
Segurança	Câmeras IR para vigilância e combate a incêndio Biometria – dispositivo para sistema de identificação de impressão digital automatizado – em inglês, <i>Device for Automated Fingerprint Identification Systems</i> (AFIS) Biometria (outros dispositivos não AFIS – iris, 3D, veias)

Fonte: PHOTONICS21, 2020, p. 97.

A produção de Fotônica está localizada principalmente na Ásia. Mais de 65% são representados pela China, Japão, Coreia, Taiwan e alguns outros países asiáticos, incluindo Vietnã, Malásia, Cingapura, Tailândia e Índia. Europa e América do Norte respondem por 16% e 15%, respectivamente. Outros países produtores de Fotônica incluem Israel, Turquia, Austrália, Nova Zelândia e Brasil (PHOTONICS21, 2020, p. 68).

No mercado global de sistemas fotônicos para Defesa e Segurança equivalente a € 43,7 bilhões em 2019, a produção europeia representou € 9,8 bilhões em 2019, ou seja, um mercado de 22% (PHOTONICS21, 2020, p. 96).

## A.5 AMBIENTES DE INOVAÇÃO

De acordo com o Manual de Oslo, publicação editada pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – em inglês, *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD) – os desafios atuais e emergentes de ordem econômica, social e ambiental demandam ideias inovadoras e maiores níveis de cooperação. A inovação e a digitalização desempenham um papel cada vez mais importante em, praticamente, todos os setores, impactando o cotidiano dos cidadãos em todo o mundo (OECD, 2018, p. 3).

A inovação tem sido identificada como uma estratégia para alcançar vantagem competitiva, principalmente em contextos de mudança e, em particular, para empresas de base tecnológica. A inovação pode ser definida como o processo de criar algo novo com valor para um indivíduo, grupo, organização, indústria ou empresa (FIATES *et al.*, 2010, p. 82-83). De acordo com Teixeira *et al.* (2017, p. 3), a inovação constitui-se em: produto, processo, marketing ou organizacional.

O conceito de inovação considerado para o presente trabalho corresponde à concepção apresentada no Manual de Oslo (OECD, 2018), publicação que aborda procedimentos de coleta e interpretação de dados de inovação. Um princípio fundamental adotado pelo referido manual, é o de que a inovação pode e deve ser medida (OECD, 2018, p. 19-20).

Pelo Manual de Oslo, o termo “inovação” pode significar tanto uma atividade quanto o resultado da atividade. Uma inovação é um produto ou processo novo ou melhorado – ou combinação deles – que difere significativamente dos produtos ou processos anteriores da unidade e que foi disponibilizado para usuários em potencial – produto – ou colocado em uso pela unidade – processo. Essa definição usa o termo genérico “unidade” para descrever o ator responsável pelas inovações, referindo-se a qualquer unidade institucional em qualquer setor, incluindo famílias e seus membros individuais (OECD, 2018, p. 20).

A definição do Manual de Oslo é desenvolvida e operacionalizada para fornecer a base para as diretrizes práticas do referido manual para o setor empresarial. Embora o conceito de inovação seja inerentemente subjetivo, sua aplicação torna-se bastante objetiva e comparável pela aplicação de pontos de referência comuns para novidade e utilidade, exigindo uma diferença significativa para ser apreciada. Isso facilita a coleta e a comunicação de dados comparáveis sobre inovação e atividades relacionadas para empresas em diferentes países e indústrias e para empresas de diferentes tamanhos e estruturas, desde pequenas empresas

de um único produto até grandes empresas multinacionais que produzem uma ampla gama de bens ou serviços (OECD, 2018, p. 20).

As atividades de inovação incluem todas as atividades de desenvolvimento, financeiras e comerciais realizadas por uma empresa que se destinam a resultar em uma inovação para a empresa. A inovação de negócios é um produto ou processo de negócios novo ou aprimorado – ou combinação deles – que difere significativamente dos produtos ou processos de negócios anteriores da empresa e que foi introduzido no mercado ou colocado em uso pela empresa (OECD, 2018, p. 20).

O processo de inovação requer infraestrutura laboratorial para a pesquisa básica, o desenvolvimento e a engenharia de produtos e processos, incluindo ensaios e testes necessários. O sistema de inovação é constituído por universidades, instituições de pesquisa e grandes laboratórios de pesquisa básica ou especializados na solução de problemas da sociedade e do setor produtivo. Os EUA possuem os laboratórios nacionais do Departamento de Energia e os Institutos Nacionais de Saúde – em inglês, *National Institutes of Health*. Na China, há os laboratórios da Academia Chinesa de Ciências, com institutos de pesquisa. A Alemanha dispõe dos institutos Max Planck e Fraunhofer (TURCHI; MORAIS, 2017, p. 26-27).

De acordo com Turchi e Morais (2017, p. 31), o Brasil adotou medidas para aumentar a inovação, como incentivos de apoio financeiro direto, de crédito e fiscais, medidas regulatórias: criação, a partir de 1999, dos fundos setoriais de Ciência e Tecnologia (C&T), da Lei nº 10.973/2004, chamada Lei de Inovação (BRASIL. CN, 2004), e da Lei nº 11.196/2005, chamada Lei do Bem (BRASIL. CN, 2005).

O artigo 1º da Lei nº 10.973/2004 estabelece medidas de incentivo à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo, com vistas à capacitação tecnológica, ao alcance da autonomia tecnológica e ao desenvolvimento do sistema produtivo nacional e regional do País (BRASIL. CN, 2004; BRASIL. CN, 2016). A Lei nº 11.196/2005 (BRASIL. CN, 2005), estabelece, em seu artigo 17, incentivos fiscais para a inovação tecnológica.

O atendimento a programas e projetos de estímulo à inovação na ID nacional e que ampliem a exploração e o desenvolvimento da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) e da Plataforma Continental é uma diretriz descrita no artigo 27, inciso II, da Lei nº 10.973/2004 (BRASIL. CN, 2004; TURCHI; MORAIS, 2017, p. 380).

## A.6 ECOSSISTEMA DE INOVAÇÃO

Um sistema, em um conceito geral, é composto de um conjunto C de componentes e um conjunto R de relações entre esses componentes. A análise de sistemas é essencialmente o exercício para caracterizar C e R. Uma caracterização comum de um sistema aberto dinâmico está em termos de transformação de entradas em saídas por meio de atividades realizadas por agentes ou atores interagindo com um ambiente (GRANSTRAND, 2020, p. 2).

A inovação tem uma longa história conceitual, com muitas conotações. A maioria das definições contemporâneas de “inovação”, vista como resultado de um processo, repousam em duas características definidoras, um grau de novidade de uma mudança e um grau de utilidade ou sucesso na aplicação de algo novo. O conceito de “novo” pode significar novo para o mundo, nação e empresa, dentre outros atores (GRANSTRAND, 2020, p. 2).

Os estudos de inovações foram desenvolvidos, pela primeira vez, na política de economia e literatura na década de 1990, com alguns antecedentes no final da década de 1980. Uma série de conceitos de inovação relacionados a sistemas foram introduzidos, como sistemas de inovação nacionais, setoriais, regionais e corporativos. Sistema de inovação é um conjunto de componentes e as relações causais que influenciam a geração e utilização de inovações e o desempenho inovador (GRANSTRAND, 2020, p. 2).

O conceito de ecossistema advém da ciência da ecologia e conceitua o fluxo de material e energia, sendo definido por fluxos de reciclagem de nutrientes ao longo de caminhos compostos de subsistemas vivos, que são organizados em funções orientadas a processos. Conecta subsistemas vivos e não vivos; gradientes de energia alimentam a reciclagem de nutrientes escassos, como, por exemplo, a floresta tropical (GRANSTRAND, 2020, p. 2).

Um ecossistema de inovação é o conjunto de atores, atividades e artefatos, e as instituições e relações, incluindo complementares e substitutas, que são importantes para o desempenho inovador de um ator ou de uma população de atores (GRANSTRAND, 2020, p. 3). O ecossistema de inovação é um complexo sistema interligado composto por três subecossistemas: ciência, tecnologia e ecossistemas de negócios (XU, 2018, p. 211). Os ecossistemas de inovação modelam a economia e viabilizam o desenvolvimento da inovação, com repercussão social (TEIXEIRA *et al.*, 2017, p. 4).

O ecossistema da ciência se concentra na pesquisa básica, gera conhecimento científico e pode ser analisado por meio da bibliometria, que auxilia aos pesquisadores a identificar “padrões ocultos” no processo de criação do conhecimento (XU, 2018, p. 211).

O ecossistema de tecnologia, com foco na tecnologia aplicada, gera conhecimento industrial e pode ser examinado usando análise de patentes, que contêm informações técnicas detalhadas, sendo indicadores úteis para as estratégias tecnológicas adotadas por empresas individuais em resposta às condições de mercado (XU, 2018, p. 211).

O ecossistema de negócios pode ser definido como uma comunidade econômica que colabora seletivamente nos produtos e serviços baseados em tecnologias centrais. Nesse ecossistema, as relações entre os principais atores são mais complexas do que em uma cadeia de valor tradicional (XU, 2018, p. 211-212). No ecossistema de negócios, as organizações atuam de modo cooperativo e competitivo, incorporando inovações. Apoia-se na interação entre organizações e indivíduos, considerados os organismos do mundo dos negócios (TEIXEIRA *et al.*, 2017, p. 4-5).

O sucesso de um ecossistema de inovação, muitas vezes, depende dos esforços de inovadores complementares operando dentro do sistema. O desenvolvimento equilibrado do valor das funções complementares na cadeia de valor é de vital importância. Portanto, primeiro devemos diagnosticar o ecossistema de inovação de acordo com sua cadeia de valor integrada (XU, 2018, p. 212).

Em um mundo de organizações cada vez mais especializadas, uma empresa normalmente não possui os recursos para desenvolver e comercializar uma proposta de valor complexa do início ao fim, sendo necessário contar com outros atores em seu ecossistema de inovação para construir uma proposta de valor para todo o ecossistema, que se materializa quando as contribuições individuais de diferentes atores são combinadas. Por um lado, a interdependência nas relações ecossistêmicas limita as empresas: por exemplo, atrasa o lançamento de novos produtos e serviços até que elementos complementares dos atores do ecossistema estejam disponíveis. Por outro lado, as empresas podem alavancar os relacionamentos do ecossistema para a criação de maior valor, explorando as sinergias e os efeitos de rede decorrentes das complementaridades entre os atores (TALMAR *et al.*, 2020, p. 1).

O mapeamento dos segmentos de Fotônica no Brasil (MASCHERONI *et al.*, 2020) foi elaborado no escopo do projeto de cooperação técnica 914BRZ2023 (BRASIL. MCTI, 2018a), firmado em 12 de junho de 2018 entre o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e

Comunicações (MCTIC), a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura – em inglês, *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO) – e a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) do Ministério das Relações Exteriores (MRE). Mascheroni *et al.* (2020, p. 7) apresentam o seguinte texto introdutório:

A Coordenação-Geral de Desenvolvimento e Inovação e Tecnologias Estratégicas (CGTE/DETEC/SEMPI/MCTI) em parceria com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, UNESCO, vem por meio do Edital nº 06/2018, do Projeto 914BRZ2023 propor um estudo para avaliar os impactos econômicos e sociais prospectivos dos investimentos em Fotônica no Brasil. O objetivo da pesquisa é a elaboração de relatórios técnicos, mapeamentos e levantamento de dados e informações das instituições científicas e tecnológicas, bem como dos setores público e privado relacionados à pesquisa, ao desenvolvimento e à inovação, envolvendo a área de Fotônica. Tal estudo fornecerá subsídios para a formulação de políticas públicas para a área de Fotônica, alinhadas ao Plano de Ação de Ciência, Tecnologia e Inovação em Tecnologias Convergentes e Habilitadoras do MCTI, de modo a melhor atender aos objetivos do desenvolvimento econômico e social do País (MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 7).

A fim de dispor de forma ordenada os dados analisados, Mascheroni *et al.* (2020) empregaram uma metodologia considerando ecossistemas. A metodologia empregada no mapeamento objetivou examinar o ecossistema de inovação nos setores de ciência, tecnologia e negócios, tendo, como ponto central, a Fotônica no Brasil, com vistas a verificar projeções futuras para efeitos econômicos e sociais decorrentes de investimentos em Fotônica no país. A interação entre o ecossistema de inovação e os ecossistemas científico, tecnológico e de negócios é ilustrada pela FIG. 4 (MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 13).

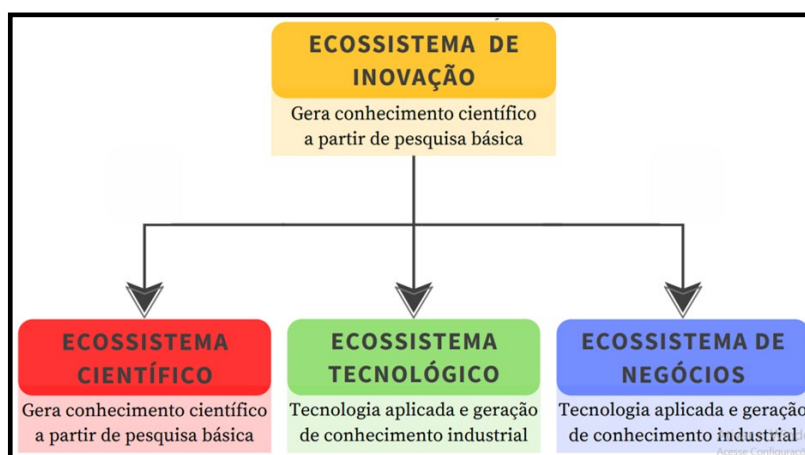


FIGURA 5 - Ecossistemas considerados na metodologia empregada por Mascheroni *et al.* (2020) para o Mapeamento sobre Fotônica no Brasil.

Fonte: MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 13.

Segundo Mascheroni *et al* (2020), o ecossistema científico gera conhecimento a partir da pesquisa básica, o tecnológico produz conhecimento industrial que gera propriedade intelectual e o ecossistema de negócios desenvolve produtos e serviços, realizando proposições de valor (MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 13).

O ecossistema científico desenvolve-se em universidades e centros de pesquisa públicos e privados. O ecossistema tecnológico é formado por ICTs e empresas, que registram a propriedade intelectual do que foi desenvolvido. O ecossistema de negócios gera resultado econômico por meio do conhecimento industrial, contribuindo na cadeia de valor para a melhoria de vida e bem-estar da população: podem ser mensurados recursos alocados pela indústria e pelos serviços nos setores da Fotônica, revelando o esforço empreendido pelas companhias nessa área (MASCHERONI *et al.*, 2020, p. 15-17).

#### A.7 CADEIA DE PRODUÇÃO DA INDÚSTRIA DE FOTÔNICA

Os sistemas microeletromecânicos – em inglês, *Micro Electro-Mechanical Systems* (MEMS) – são dispositivos produzidos em escala micrométrica, por meio de técnicas de microfabricação, com origem nos Circuitos Integrados (CI). Os Acelerômetros são dispositivos MEMS de grande comercialização. Os sensores de alta aceleração e choque utilizados para a liberação do *air-bag* constituem acelerômetros MEMS de baixo ou médio desempenho na indústria automotiva, incluindo sensores de baixa aceleração, empregados na suspensão ativa e controle de estabilização do veículo. Os dispositivos de alto desempenho apresentam uso em navegação inercial, veículos não tripulados aquáticos e aéreos, sismógrafos, instrumentos espaciais e aplicações militares, em função do tamanho reduzido, baixa dissipação de potência e alto desempenho (TEVES, 2013, p. 2-3).

A tecnologia para acelerômetros tende a empregar MEMS à base de silício ou quartzo ressonante. Essa tecnologia integra elementos mecânicos, sensores, atuadores e eletrônica em um substrato de silício comum, por meio da microfabricação: processos compatíveis de microusinagem, que moldam a base de silício, retirando material ou adicionando camadas, formando dispositivos mecânicos e eletromecânicos (CGEE, 2010, p. 18, 47).

O fosfeto de índio (InP), arseneto de gálio (AsGa) e nitreto de gálio (GaN) são semicondutores compostos utilizados em dispositivos que envolvam emissão de luz ou

aplicações em telecomunicação (CGEE, 2010, p. 75). O AsGa e o nitreto de gálio e índio (InGaN) são semicondutores usados na fabricação de LEDs (CGEE, 2010, p. 105).

A cadeia de produção da indústria de Fotônica se divide em cinco níveis (FIG. 6): produção de materiais avançados e componentes, que combinados formam subsistemas (módulos, dispositivos) e sistemas com diferentes atributos, sendo o último nível os aplicativos – equipamentos constituídos por subsistemas e sistemas integrados (PEREIRA, 2008, p. 51).

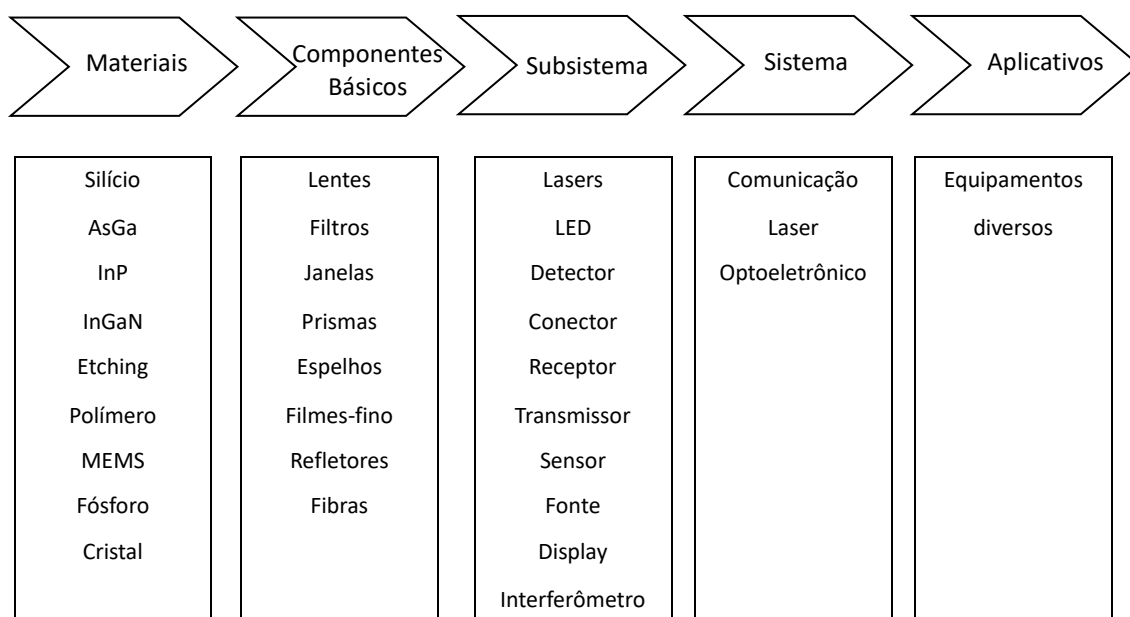


FIGURA 6 - Cadeia de produção da indústria de Fotônica.

Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2008, p. 51.



## APÊNDICE B – LEVANTAMENTO JUNTO À INTEGRANTE DA SEPROD

Entrevistada: Dra. Fernanda das Graças Corrêa.

Coordenadora no Departamento de Ciência, Tecnologia e Inovação do Ministério da Defesa, Pós-doutoranda em Modelagem de Sistemas Complexos pela USP, Pós-Doutora em Ciências Militares pela ECEME, Doutora em Ciência Política na área de Concentração Estudos Estratégicos pela UFF, Pesquisadora do Grupo de Estudos em Tecnologias de Defesa e a Evolução do Pensamento Estratégico (GETED) pela UNESP e Pesquisadora na linha Prospectiva Tecnológica & Emprego Militar no biênio 2020/2021 do Centro de Estudos Estratégicos do Exército (CEEEEx). A publicação das respostas foi autorizada pela Dra. Fernanda das Graças Corrêa e são opiniões pessoais e não institucionais.

### B.1 PERGUNTAS

1) O Sr(a). teve a oportunidade de abordar o assunto “laser” em produção literária?

**Resposta:** Sim.

2) O Sr(a). teve a oportunidade de participar de alguma fase de desenvolvimento tecnológico envolvendo “laser”? Caso afirmativo, em que fase, em que local e para qual aplicabilidade?

**Resposta:** Não.

3) O Sr(a). acredita que o desenvolvimento autóctone de tecnologia laser para AED poderia se tornar uma realidade? Caso afirmativo, o que considera necessário? Caso negativo, o que considera impeditivo?

**Resposta:** Sim. Maior apoio das entidades governamentais de CT&I para garantir a continuidades das pesquisas nesta área e evitar a evasão de cérebros do País.

4) O Sr(a). tem conhecimento acerca de segmentos brasileiros, públicos ou privados, que possuam infraestrutura e/ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de tecnologia laser, e que poderiam contribuir com alguma das fases do desenvolvimento tecnológico inferido?

**Resposta:** Sim. O Instituto de Estudos Avançados da Força Aérea Brasileira implementou o Plasil I e criou o Plasil II, programa que abriga projetos com aplicações de laser para fins comerciais. Na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH/USP), há estudos em pesquisa básica do uso dual do laser tanto nas 3 Forças quanto na área oncológica. Há estudos em pesquisa aplicada em outros institutos da USP também, mas na área de Saúde.

5) O Sr(a). poderia elencar possíveis desafios, à indústria de Defesa brasileira, para o desenvolvimento de tecnologia laser para AED?

**Resposta:** Falta de investimentos de entidades governamentais de CT&I e priorização em chamadas públicas e programas estratégicos em pesquisa aplicada e desenvolvimentos experimentais em tecnologias duais de laser criam óbices ao desenvolvimento de produtos e respectiva inserção mercadológica.

6) Em 2021, o MCTI publicou duas portarias para incentivar o desenvolvimento da área de Fotônica: a Portaria nº 4.532/2021 (BRASIL. MCTI, 2021b), que trata da Iniciativa Brasileira de Fotônica (IBFóton), e a Portaria nº 4.530/2021 (BRASIL. MCTI, 2021a), que trata do Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica (Sisfóton-MCTI). O Sr(a). acredita que a IBFóton e o Sisfóton-MCTI possam gerar um ambiente favorável ao desenvolvimento inferido?

**Resposta:** os cortes no orçamento de CT&I e as reduções de bolsas de pesquisa nas agências de fomento à inovação, como CAPES e CNPq, desqualificam iniciativas importantes como estas à medida que não valorizam os recursos humanos altamente qualificados e não priorizam a continuidade de suas pesquisas. Programas como estes são programas de Estado que emprega recursos humanos e materiais a fim de criar, manter e consolidar conhecimento no País por gerações.

7) Qual a sua opinião acerca de possíveis opções de financiamento para o desenvolvimento tecnológico inferido, na hipótese de sua implementação ser factível? Quais modalidades de financiamento acredita serem pertinentes?

**Resposta:** Geralmente, Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICT) civis e militares não são proprietárias de seus recursos financeiros nem podem lucrar com os produtos oriundos de seu desenvolvimento autóctone. Pequenas empresas e *startups* que são

sejam *spin off* também não têm condições de sustentar o desenvolvimento de tecnologia disruptiva em todas as fases do (Nível de Maturidade Tecnológica (TRL, sigla em inglês,) sem aporte de recurso financeiro e/ ou apoio de grandes entidades, como bancos, empresas e associações empresariais. Para estas entidades citadas, a melhor opção de investimento é por meio de recursos não reembolsáveis de grandes entidades governamentais. Portanto, a opção de financiamento com longos prazos e taxas especiais em programas específicos de setores prioritários/estratégicos só é válida para empresas grandes.

8) O Sr(a). vislumbra algum modelo de política pública, programa de CT&I ou negócio que possa, por ventura, dar suporte ao desenvolvimento tecnológico inferido, na hipótese de sua implementação ser factível no Brasil?

**Resposta:** as demandas de setores específicos da Defesa geralmente não são atendidas ou priorizadas em políticas públicas e programas de CT&I. Os acordos de cooperação em Defesa entre o Brasil e países aliados, em geral, envolvem muito mais aquisições do que negócios envolvendo cooperação tecnológica. É preciso que o MD crie uma estrutura de CT&I tal qual uma agência de inovação que demande a elaboração de chamadas públicas e programas estratégicos e se utilize de instrumentos jurídicos, como encomendas tecnológicas, com foco prioritário no desenvolvimento de tecnologias estratégicas disruptivas duas integrando diversos atores tal qual um ecossistema. O MD precisa incentivar cada vez mais as suas ICT a desenvolverem tecnologias com empresas nacionais permitindo que o conhecimento se mantenha e se consolide no País.

9) O Sr(a). gostaria de acrescentar informações sobre o assunto?

**Resposta:** Não é necessário.

10) O Sr(a). autoriza que vosso nome e a instituição a que pertence sejam mencionados no trabalho escrito a ser entregue à EGN? O Sr(a). autoriza a publicação das respostas apresentadas por V. Sa. como apêndice ao trabalho a ser entregue à EGN? O Sr(a). autoriza que um currículo resumido de até 5 linhas sobre V Sa. seja publicado no trabalho a ser entregue à EGN? Quanto ao currículo, caso afirmativo, gostaria de sugerir o texto?

**Resposta:** autorizo desde que informe no trabalho que são opiniões pessoais e não institucionais.

## APÊNDICE C – LEVANTAMENTO JUNTO A INTEGRANTE DO MEIO ACADÊMICO

Entrevistado: Prof. Dr. JESSE WERNER COSTA.

Pós-Doutorando em Instrumentação e Ótica Aplicada no IME, Doutor em Instrumentação e Ótica Aplicada pelo CEFET-RJ, Mestre em Engenharia Eletrônica pelo Illinois Institute of Technology-Chicago-USA, Especialista em Docência do Ensino Superior pela UFRJ, Engenheiro Eletrônico pela UFRJ. Professor de Eletromagnetismo e Eletrônica na Escola Naval (1981-presente), Professor de Eletrônica do CEFET-RJ (1980-2013), Cientista Convidado e colaborador do Fermilab-Fermi National Accelerator Laboratory-USA (1993-2009), Colaborador do CERN-Organização Europeia para Pesquisa Nuclear-Genebra-Suíça (2007-2012), Professor Visitante da Universidade de Ciências Aplicadas de Munique-Alemanha (1989-2012).

### C.1 PERGUNTAS

1) O Sr(a). teve a oportunidade de abordar o assunto “laser” em produção literária?

**Resposta:** Indiretamente. O laser foi fonte de luz para pesquisas de resolução de tempo em detector de colisão de partículas e em sensores a fibra ótica. Ambos os resultados foram publicados em artigos.

2) O Sr(a). teve a oportunidade de participar de alguma fase de desenvolvimento tecnológico envolvendo “laser”? Caso afirmativo, em que fase, em que local e para qual aplicabilidade?

**Resposta:** Em estudo de tempo de propagação da luz em fibra ótica cintilante, fontes laser foram empregadas juntamente com filtros de densidade neutra. Experimento realizado no Fermi National Accelerator Laboratory – FERMILAB, em Batavia, Illinois, USA. Essa fase do experimento simulava colisão de partículas em fibra cintilante para estudo de resolução de tempo em um detector.

Em estudo de sensores a fibra ótica, usando efeito de interferência multimodal, fontes laser foram empregadas em bancada ótica no Instituto Militar de Engenharia – IME, Urca, Rio de Janeiro, RJ. O experimento pesquisou as características de fibras óticas usadas como sensor de curvatura e anemômetro.

3) O Sr(a). acredita que o desenvolvimento autóctone de tecnologia laser para AED poderia se tornar uma realidade? Caso afirmativo, o que considera necessário? Caso negativo, o que considera impeditivo?

**Resposta:** Sim, pode vir a ser realidade, mas envolve estudo profundo de feixe ou pulso laser de alta potência e como contornar problemas de absorção de energia no meio de propagação etc. Existem estudos neste sentido, mas o custo ainda é alto e os resultados ainda não são muito práticos. Feixes de laser de baixa/média potência tem sido pesquisados para armas de incapacitação visual.

4) O Sr(a). tem conhecimento acerca de segmentos brasileiros, públicos ou privados, que possuam infraestrutura e/ou capacidade técnico-científico-profissional para desenvolvimento de tecnologia laser, e que poderiam contribuir com alguma das fases do desenvolvimento tecnológico inferido?

**Resposta:** Várias universidades no Rio de Janeiro possuem laboratórios para pesquisa em ótica, incluindo laser, como o Labfot no IME, o Lafot no CEFET-RJ e o Lab. de ótica do Instituto de Física da UFF. Para pesquisa neste tema os laboratórios necessitariam investimentos em recursos específicos, mas acredito poderem ser úteis em diversas fases da pesquisa em questão.

5) O Sr(a). poderia elencar possíveis desafios, à indústria de Defesa brasileira, para o desenvolvimento de tecnologia laser para AED?

**Resposta:** Os maiores desafios remetem às políticas de investimento em Ciência e Tecnologia. Bons pesquisadores e motivação temos em nível de excelência, mas, dada a complexidade do tema, sem recursos nada é possível.

6) Em 2021, o MCTI publicou duas portarias para incentivar o desenvolvimento da área de Fotônica: a Portaria nº 4.532/2021 (BRASIL. MCTI, 2021b), que trata da Iniciativa Brasileira de Fotônica (IBFóton), e a Portaria nº 4.530/2021 (BRASIL. MCTI, 2021a), que trata do Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica (Sisfóton-MCTI). O Sr(a). acredita que a IBFóton e o Sisfóton-MCTI possam gerar um ambiente favorável ao desenvolvimento inferido?

**Resposta:** Sim, desde que envolvam investimentos proporcionais à complexidade e importância das pesquisas. O que temos visto por décadas, são sucessivos cortes de recursos nas áreas de Ciência e Tecnologia. Como mencionado na resposta à pergunta anterior, bons pesquisadores e motivação temos em nível de excelência. Digo isso com experiência em várias instituições de pesquisa internacionais como FERMILAB-USA, CERN-Suíça e Universidade de Ciências Aplicadas de Munique na Alemanha, onde pude conviver com pesquisadores do mundo todo.

7) Qual a sua opinião acerca de possíveis opções de financiamento para o desenvolvimento tecnológico inferido, na hipótese de sua implementação ser factível? Quais modalidades de financiamento acredita serem pertinentes?

**Resposta:** Acredito que instituições de pesquisa das Forças Armadas possam ser opções.

8) O Sr(a). vislumbra algum modelo de política pública, programa de CT&I ou negócio que possa, por ventura, dar suporte ao desenvolvimento tecnológico inferido, na hipótese de sua implementação ser factível no Brasil?

**Resposta:** Como o tema é de interesse para todas as três Forças. Acredito que o Ministério da Defesa seja a principal Instituição a ser envolvida.

9) O Sr(a). gostaria de acrescentar informações sobre o assunto?

**Resposta:** No âmbito militar, a Ciência e a Tecnologia sempre tiveram importância elevada. As atividades que envolvem desenvolvimento e emprego de ciência e tecnologia possuem diversas características estratégicas, tais como: econômica, política, social, segurança e Defesa. Dentre as maiores economias mundiais e as Forças Armadas mais poderosas do planeta, há em comum um alto padrão de desenvolvimento e emprego maciço de ciência e tecnologia em suas sociedades e em suas forças de segurança.

Aprofundar o emprego de aplicações tecnológicas, desde o projeto até a aplicação, sem dominar tecnologia própria, gera uma situação de dependência tecnológica, implicando, em última análise, um cenário de vulnerabilidade em termos de estratégia nacional. Dependendo de tecnologia externa coloca o país em risco de flutuar ao sabor das políticas e mercados internacionais, correndo risco de ter parte de alguns serviços paralisados, se a situação externa

assim determinar. Portanto, é fundamental produzir tecnologia própria e ter autonomia em todos os setores na área de Defesa Nacional.

[Quevedo-Lodi, Cláudia e Costa, Jesse Werner – OS DESAFIOS DA FORMAÇÃO DE OFICIAIS DE MARINHA DIANTE DAS CONSTANTES INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS, Revista de Villegagnon, Ano IX, Número 9, p. 84-88, 2014]

10) O Sr(a). autoriza que vosso nome e a instituição a que pertence sejam mencionados no trabalho escrito a ser entregue à EGN? O Sr(a). autoriza a publicação das respostas apresentadas por V. Sa. como apêndice ao trabalho a ser entregue à EGN? O Sr(a). autoriza que um currículo resumido de até 5 linhas sobre V Sa. seja publicado no trabalho a ser entregue à EGN? Quanto ao currículo, caso afirmativo, gostaria de sugerir o texto?

**Resposta:** Sim, autorizado em todos os casos mencionados.