

SISTEMAS E APLICAÇÕES DE TECNOLOGIA PARA O EXÉRCITO BRASILEIRO¹

SYSTEMS AND TECHNOLOGY APPLICATIONS FOR THE BRAZILIAN ARMY

IDUNALVO MARIANO DE ALMEIDA JÚNIOR
FABIO ANDRADE DE ALMEIDA

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo trazer uma proposta de alinhamento entre as capacidades operativas do Exército Brasileiro, os sistemas e materiais de emprego militar e as suas tecnologias componentes. Esse relacionamento é estabelecido a partir do entendimento de o que são sistemas, ou sistemas de sistemas, que atendem às necessidades materiais de uma capacidade militar. Inicialmente, partindo de uma ampla revisão bibliográfica e documental, duas categorias de tecnologias de Defesa são definidas, cobrindo tanto as necessidades imediatas, quanto as potencialidades futuras. Em seguida, um processo de priorização de tecnologias é proposto, o qual requer alinhamento estratégico para a definição de quais áreas ou sistemas são prioritários em função das necessidades operacionais. O resultado do alinhamento das tecnologias atuais e futuras com a priorização estratégica para as aplicações cibernéticas é mostrado ao final do artigo.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas; Tecnologias; Capacidades; Projetos Estratégicos.

ABSTRACT

This work aims to bring a proposal for alignment between the operational capabilities of the Brazilian Army, the systems and materials for military use and its component technologies. This relationship is established from the understanding that systems, or systems of systems, is what meets the material needs of a military capability. Initially, based on a bibliographical and document review, two categories of defense technologies are defined, covering both immediate needs and future potential. Then, a technology prioritization process is proposed, which requires strategic alignment to define which areas or systems are a priority based on operational needs. The result of aligning current and future technologies with the strategic prioritization for cybernetics applications is then shown at the end of the article.

KEYWORDS: Systems; Technologies; Capabilities; Strategic Projects.

OS AUTORES

Chefe da Divisão de Difusão do C DoutEx/COTER; Cel de Material Bélico do EB; antigo Comandante do Centro de Logística de Mísseis e Foguetes; Mestre em Ciências Militares pelo Instituto Meira Mattos/ECOME; Graduado em Direito pela UFPR; Pós-graduado em Ciências Militares (Logística / EsAO), Direito Militar e Psicopedagogia (UFRJ).



Chefe do Centro de Planejamento e Controle da CISCEA; Cel Engenheiro da FAB; antigo Diretor do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno e do IEAv; Doutor em Engenharia pela Universidade Técnica de Braunschweig (Alemanha); Engenheiro Aeronáutico pelo ITA.



¹ Artigo baseado no Projeto Interdisciplinar “Tecnologias militares, obtenção de capacidades operativas, SMEM e pesquisas: alinhamento para o planejamento estratégico” do Curso de Política, Estratégia e Alta Administração do Exército, do ano de 2022.

1. Introdução

Tecnologia é uma resposta para diversas demandas da sociedade. Necessidades individuais e coletivas são, cada vez mais, atendidas por produtos e serviços de grande intensidade tecnológica, impulsionando a experimentação de novas ideias que se tornarão, de fato, inovação, gerando ganhos econômicos para aqueles que detêm a propriedade intelectual adquirida ao longo do desenvolvimento científico e tecnológico das soluções obtidas.

É inegável a percepção do impacto que a tecnologia trouxe à vida cotidiana. Pode-se afirmar que, desde a década de 70 do século passado, vivemos no que tem sido denominada “era digital”, um mundo no qual digitalização, computação, microprocessadores e informação em rede, literalmente, chegaram ao bolso do usuário comum. A aplicação desses novos recursos no setor de Defesa ainda requer profundas mudanças doutrinárias, demonstrando que tanto a tecnologia quanto o usuário se encontram em um círculo virtuoso de criação de experiências e possibilidades de emprego.

A era digital estabelecida consolidou as sociedades de informação em países desenvolvidos sem substituir as tecnologias tradicionais voltadas para a mecanização dos meios, que, pelo contrário, potencializa, habilita e multiplica novos sistemas e subsistemas físicos. Ao mesmo tempo em que surgem possibilidades, também emergem novos desafios e ameaças, principalmente entre aquelas que miram a ruptura do ciclo da geração da informação para decisão e a segurança dos dados que circulam nas complexas redes que conectam usuários, sistemas e plataformas.

Um atributo relevante a se considerar é o caráter aplicado das soluções tecnológicas no âmbito das Forças Armadas. Os sistemas de emprego militar têm seu papel bem definido para o atingimento das capacidades operativas, delimitando claramente quais são os grandes

grupos de aplicações essenciais de material. Esses grupos são facilmente identificados dentro de uma perspectiva histórica, tendo, como base ou foco, o combatente humano e os grandes sistemas de realização física e mecânica, chamados plataformas, com seus armamentos e munição, sendo suportados por estruturas, instalações e as funções logísticas.

No instante seguinte, surgem as aplicações decorrentes da era digital, trazendo diversas possibilidades para obtenção de dados, processamento de informação e tomada de decisão. Desses dois grupos de aplicações emergiram novas necessidades de atuação em segurança, agora, nos domínios Cibernético e de Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear (QBRN).

Assim sendo, o domínio do ciclo tecnológico completo, desde a concepção até a operação do sistema, é considerado cada vez mais uma vantagem competitiva, sendo objeto de proteção pelos países que obtêm o domínio dos processos de pesquisa e desenvolvimento. Agir no sentido de romper com os ciclos de desenvolvimento tecnológico de outra nação é também uma prática corrente, restringindo o acesso a determinadas tecnologias, componentes ou elementos, de forma que o sistema de emprego militar não venha a ser integrado e colocado em operação.

Portanto, é de grande importância identificar e compreender o papel que tecnologias atuais e futuras desempenham na obtenção de capacidades operativas que possam trazer vantagem durante o emprego militar. Aliada a isso, e não menos importante, é a capacidade de integrar, testar e colocar em operação o sistema que, de fato, permitirá a execução da missão, seja de uma plataforma terrestre, de comando e controle ou de ações no domínio cibernético.

O presente trabalho se desenvolve trazendo uma série de contribuições para consolidação de uma gestão relevante de portfólio de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em Defesa.

Inicialmente, é apresentada uma abrangente revisão da literatura sobre os tipos de tecnologia relevantes para a Defesa, que se agrupam de acordo com o potencial de aprimoramento nos sistemas de emprego militar ou a dependência atual de vários sistemas em torno de uma mesma tecnologia. Em seguida, é proposta uma classificação e agrupamento desses diversos tipos, de forma a capturar características relevantes para as soluções de material para o Exército Brasileiro. Uma sistemática de priorização de tecnologias para aplicação em sistemas essenciais de Defesa é, então, explanada, sendo aplicada no contexto atual para definir quais tecnologias o Exército Brasileiro necessita dominar no curto prazo e quais serão objeto de pesquisa básica e aplicada para produção de resultados em médio e longo prazo. Pretende-se, assim, fortalecer a conexão entre capacidades operativas, aplicações essenciais de sistemas de emprego militar e as tecnologias que suportam essas aplicações, tanto no momento presente quanto no futuro.

2. Classificação dos tipos de tecnologia

O assunto tecnologia é vasto na literatura acadêmica e na aplicação e, portanto, necessita de uma delimitação quanto ao escopo. Neste trabalho, serão apresentadas e discutidas tecnologias que, inicialmente, possuem alguma afinidade ou potencial de aplicabilidade com a área de Defesa.

2.1 Crítica

Como discutido anteriormente, a interrupção de alguma fase no ciclo de desenvolvimento de um sistema de defesa pode conduzir à incapacidade de uma Força atingir o status operacional desejado. Isso pode acontecer quando do encerramento de um projeto ainda na fase conceitual ou, até mesmo, durante o desenvolvimento e a produção, com acesso negado a componentes e elementos

constituintes de um sistema mais amplo.

O Departamento de Defesa dos EUA (DoD, sigla em inglês) considera como críticas aquelas tecnologias que mantém o seu desempenho superior e, portanto, precisam ter o acesso negado para outros países. Em 2001, o DoD definiu tecnologia militar crítica como “aquela cujos parâmetros de desempenho estão em igual nível ou acima do mínimo necessário para garantir desempenho superior contínuo dos sistemas militares dos EUA” (DEPARTAMENTO DE DEFESA, 2001, p. 2, tradução nossa).

Nessa esteira, tecnologias críticas são consideradas:

[...] essenciais para o projeto, desenvolvimento, produção, operação, aplicação ou manutenção de um artigo ou serviço que faça, ou possa contribuir significativamente para o potencial militar de qualquer país, incluindo os Estados Unidos. Isso inclui, mas não se limita a: *know-how* de projeto e fabricação, dados técnicos, *software*, equipamentos fundamentais e equipamentos de inspeção e teste (DEPARTAMENTO DE DEFESA, 2017, p. 20, tradução nossa).

Mais recentemente, o GAO (*U.S. Government Accountability Office*) - Controladoria-Geral dos EUA - estabeleceu que:

Tecnologias críticas – tais como inteligência artificial e biotecnologia – são aquelas necessárias para manter a superioridade tecnológica dos EUA e, portanto, são frequentemente alvo de furto, espionagem e exportação ilegal pelos adversários (ESCRITÓRIO DA CONTROLADORIA-GERAL, 2021, p. 1, tradução nossa).

Um dos instrumentos utilizados, desde 1979, pela administração federal dos EUA para controle de exportação e acesso às tecnologias críticas, é a lista denominada MCTL (*Militarily Critical Technology List*) – Lista de Tecnologias Militares Críticas (DEPARTAMENTO DE DEFESA, 2018). O objetivo principal dessa relação é prover uma referência técnica para o desenvolvimento e a implementação de

políticas de segurança do DoD em transferências internacionais de bens, serviços e tecnologias. O próprio DoD é responsável pela atualização periódica da lista e a publicação pode não acontecer de forma ostensiva. A versão de 2001 da MCTL (DEPARTAMENTO DE DEFESA, 2001) apresenta 18 áreas de tecnologias críticas:

- 1 - sistemas aeronáuticos;
- 2 - armamentos e materiais energéticos;
- 3 - sistemas químicos e biológicos;
- 4 - sistemas de energia cinética e dirigida;
- 5 - eletrônicos;
- 6 - sistemas terrestres;
- 7 - guiamento, navegação e controle de veículos;
- 8 - sistemas da informação;
- 9 - tecnologia da informação no ambiente de guerra;
- 10 - manufatura e fabricação;
- 11 - materiais;
- 12 - sistemas marítimos;
- 13 - sistemas nucleares;
- 14 - sistemas de potência;
- 15 - sensores e *lasers*;
- 16 - controle de assinaturas ;
- 17 - sistemas espaciais; e
- 18 - efeitos de armas e contramedidas.

As áreas apresentadas cobrem praticamente todos os sistemas de emprego militar, desde tecnologias componentes até plataformas terrestres, marítimas, aéreas e espaciais. Muitas dessas tecnologias transpassam vários tipos de aplicação, como, por exemplo, sensores e *laser*. Embora seja uma lista que foi publicada há mais de vinte anos, se mantém atual para ser aplicada aos processos de pré-concepção e concepção de sistemas de defesa. O uso rigoroso da MCTL por parte da administração federal dos EUA, como instrumento de controle de transferência de bens, serviços e tecnologias, pode trazer sérias restrições no acesso a praticamente todos

os sistemas e materiais necessários para atender às capacidades operativas da Força.

Com relação ao uso por outros países do termo “crítico” para tecnologias, o governo da Austrália estabeleceu recentemente em 2021 que:

As tecnologias críticas são tecnologias atuais e emergentes com a capacidade de aumentar significativamente ou representar risco para nossos interesses nacionais (prosperidade econômica, coesão social e/ou segurança nacional)(GABINETE DO PRIMEIRO-MINISTRO, 2021, p. 1, tradução nossa, grifo nosso).

Em documento complementar, também de 2021, a administração federal australiana estabeleceu a lista de tecnologias críticas de interesse nacional (GOVERNO DA AUSTRÁLIA, 2021):

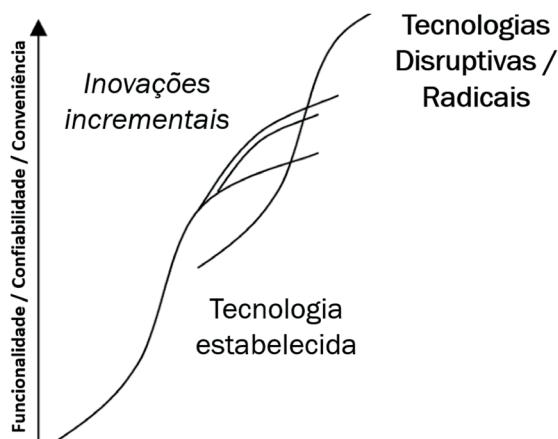
- 1 - materiais avançados e fabricação;
- 2 - inteligência artificial, computação e comunicações;
- 3 - biotecnologia, tecnologia genética e vacinas;
- 4 - energia e ambiente;
- 5 - quântica;
- 6 - sensoriamento, tempo e navegação; e
- 7 - transporte, robótica e espaço.

Portanto, as listas de tecnologias críticas estabelecidas pelos EUA e pela Austrália trazem um direcionamento para a aplicação em sistemas reais que resolverão problemas de Defesa e Segurança de uma forma mais abrangente. Na maioria dos casos, a tecnologia por si só não compõe o sistema completo para emprego, necessitando de uma definição clara e compreensiva de quais serão as aplicações. **A caracterização das tecnologias componentes e das aplicações em Defesa será de vital importância na elaboração, classificação e priorização de listas de tecnologia, quanto à aplicabilidade, temporalidade e maturidade de cada uma delas.**

2.2 Disruptiva

Disrupção é, sem dúvida, um dos conceitos mais utilizados atualmente em Ciência, Tecnologia e Inovação para tecnologias que conduzem a novos patamares de funcionalidade. Na literatura, a ideia foi abordada, pela primeira vez, em 1995 (BOWER; CHRISTENSEN, 1995) para tratar de exemplos na indústria onde determinadas inovações tecnológicas trouxeram alteração abrupta nos atributos dos produtos oferecidos aos clientes. A **figura 1** ilustra o que as tecnologias disruptivas representam na “curva S” do desempenho de um determinado produto. Enquanto inovações incrementais prolongam funcionalidade ou confiabilidade, as disruptivas trazem a possibilidade de iniciar uma nova curva em um patamar superior.

Figura 1 - Curva “S” do ciclo de vida de um produto



Fonte: adaptado de (BOWER; CHRISTENSEN, 1995)

Dentro da área de Defesa e Segurança, o conceito de disruptão foi recentemente abordado por Lele (2019), estabelecendo que “tecnologias disruptivas são aquelas tecnologias revolucionárias que repentina e inesperadamente deslocam uma tecnologia estabelecida do mercado” (LELE, 2019, p. 34, tradução nossa). O autor, então, apresenta dez tipos de tecnologias que poderão trazer um salto de operacionalidade para o emprego militar nas próximas décadas:

- 1 - armas hipersônicas;
- 2 - novos materiais;
- 3 - impressão 3D;
- 4 - fontes de energia inesgotáveis;
- 5 - genômica de última geração;
- 6 - inteligência artificial;
- 7 - *big data*;
- 8 - computação em nuvem;
- 9 - internet das coisas (*IoT*); e
- 10 - *blockchain*.

Um dos motivos do forte apelo do conceito de tecnologias disruptivas é a ideia de uma revolução trazida por métodos, técnicas e processos que possam substituir procedimentos tradicionais. Enquanto tecnologias consagradas seguem um caminho de evolução incremental, as disruptivas seriam aquelas que trariam uma quebra de sequência para definir uma nova trajetória.

2.3 Emergente

Diversos autores têm se dedicado ao trabalho de melhor conceituar a questão da emergência de tecnologias. Uma das publicações mais proeminentes sobre o assunto foi divulgada em 2015, pelos Professores Daniele Rotolo, Diana Hicks e Ben R. Martin. Após extensa revisão bibliográfica, os autores propuseram a seguinte definição para tecnologias emergentes:

Concebemos uma tecnologia emergente como uma inovação radical e de crescimento relativamente rápido, caracterizada por um certo grau de coerência persistente ao longo do tempo e com potencial para exercer um impacto considerável no(s) domínio(s) socioeconômico(s), que é observado em termos de composição e posição de atores, instituições e padrões de interações, acompanhado dos processos de produção de conhecimento associados. Seu maior impacto proeminente, no entanto, está no futuro e, portanto, na fase inicial ainda é um pouco incerta e ambígua (ROTOLO; HICKS; MARTIN, 2015, p. 1828, tradução nossa).

Dessa definição decorrem cinco atributos-chave das tecnologias emergentes: a) novidade radical; b) crescimento relativamente rápido; c) coerência; d) impacto proeminente e; e) incerteza e ambiguidade. O atributo de coerência justamente distingue essas tecnologias daquelas que não alcançaram maturidade ou algum campo de aplicação que trouxesse adoção. Contudo, o atingimento de novos níveis de funcionalidade e desempenho ainda é incerto, introduzindo o fator risco nos investimentos de P&D sobre essas tecnologias.

O aspecto da novidade radical traz a comparação inevitável com a definição de tecnologias disruptivas. De fato, as duas conceituações estão presentes na literatura e, em muitos casos, se entrelaçam, sendo frequentemente utilizadas quase como sinônimos. Contudo, em 2018, um estudo bibliométrico foi publicado com o intuito de levantar uma possível distinção entre as duas categorias, concluindo que a definição de tecnologia disruptiva está mais estruturada academicamente, enquanto que a emergente ocupa uma posição mais operacional (LI; PORTER; SUOMINEN, 2018).

Como exemplo de tecnologias emergentes aplicadas ao setor de Defesa e Segurança, o Congresso dos EUA emitiu, em 2021, uma lista que pode ter um impacto significativo na segurança nacional daquele país nos anos seguintes. Essas tecnologias incluem (SERVIÇO DE PESQUISA DO CONGRESSO, 2021, p.1, tradução nossa):

- 1 - inteligência artificial;
- 2 - armas autônomas letais;
- 3 - armas hipersônicas;
- 4 - armas de energia dirigida;
- 5 - biotecnologia; e
- 6 - tecnologia quântica.
- 1 - biotecnologia;
- 2 - inteligência artificial (IA) e tecnologia de aprendizado de máquina;
- 3 - posicionamento, navegação e tempo (pnt);
- 4 - tecnologia de microprocessador;
- 5 - tecnologia de computação avançada;
- 6 - tecnologia de análise de dados;
- 7 - informação quântica e tecnologia de detecção;
- 8 - tecnologia de logística;
- 9 - manufatura aditiva;
- 10 - robótica;
- 11 - interfaces cérebro-computador;
- 12 - hipersônica;
- 13 - materiais avançados; e
- 14 - tecnologias avançadas de vigilância.

Nota-se a semelhança dessa lista com outras anteriormente apresentadas, com a introdução do assunto das armas autônomas letais, gerado a partir de um relacionamento

cruzado de inteligência artificial, robótica e plataformas autônomas. O assunto LAWS – *Lethal Autonomous Weapon Systems* – tem sido objeto de estudo, não apenas técnico ou operacional, mas também, no que se refere aos aspectos éticos e legais do emprego armado de um sistema com capacidade autônoma de engajamento (EKELHOF; PAOLI, 2020).

2.4 Fundacional

Além da MCTL, que, desde 1979, vem sendo atualizada, mais recentemente, o Departamento de Comércio dos EUA propôs uma mudança na legislação de controle de exportação para incluir tecnologias emergentes que podem se tornar importantes para a segurança daquele país (BUREAU DE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SEGURANÇA, 2018), sendo denominadas tecnologias fundacionais. A relação, proposta para colaborações e revisões, incluía as seguintes categorias:

- 1 - biotecnologia;
- 2 - inteligência artificial (IA) e tecnologia de aprendizado de máquina;
- 3 - posicionamento, navegação e tempo (pnt);
- 4 - tecnologia de microprocessador;
- 5 - tecnologia de computação avançada;
- 6 - tecnologia de análise de dados;
- 7 - informação quântica e tecnologia de detecção;
- 8 - tecnologia de logística;
- 9 - manufatura aditiva;
- 10 - robótica;
- 11 - interfaces cérebro-computador;
- 12 - hipersônica;
- 13 - materiais avançados; e
- 14 - tecnologias avançadas de vigilância.

O conceito de tecnologia fundacional parece ter como objetivo englobar tecnologias emergentes com potencial de se tornarem críticas, ou seja, proporcionar, desde já, à administração federal dos EUA, o suporte técnico

e assessoramento para que essas tecnologias também tenham seu acesso controlado ou até mesmo negado.

2.5 Habilitadora

A presença frequente de algumas tecnologias nas listas até aqui apresentadas indica que existe um conjunto que suporta um número expressivo de aplicações, não sendo específica de apenas um tipo de sistema, mas de vários e em diversos domínios. Assim, surge a classificação de tecnologias habilitadoras para caracterizar a dependência que muitos sistemas de emprego militar possuem de uma tecnologia específica. A importância desse assunto fez com que, em 2021, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) publicasse a Política de Desenvolvimento Científico, Tecnológico e Inovação para Tecnologias Habilitadoras, considerando a seguinte definição:

São tecnologias intensivas em conhecimento científico e tecnológico, com potencial de gerar ciclos rápidos de inovação e que demandam alto investimento e capital humano especializado, sendo este conjunto de tecnologias multidisciplinar e com a capacidade de gerar a inovação de processos, bens e serviços em toda a economia e um impacto profundo em todos os campos de conhecimento, beneficiando o aumento do desempenho humano, seus processos e produtos, a qualidade de vida e justiça social (BRASIL, 2021c).

Dentro da abordagem ampla proposta pelo MCTI, a Portaria que estabelece a Política para tecnologias habilitadoras define a seguinte lista de prioridades em C&TI nacional:

- 1 - nanotecnologia;
- 2 - fotônica;
- 3 - acústica;
- 4 - biotecnologia;
- 5 - materiais avançados;
- 6 - inteligência artificial;

- 7 - internet das coisas;
- 8 - tecnologias para economia 4.0;
- 9 - robótica; e
- 10 - computação quântica.

Das dez tecnologias nominadas como habilitadoras, oito delas foram listadas nas seções anteriores. Surgem agora as tecnologias de Acústica e Fotônica, que não haviam sido relacionadas nas categorias de emergentes e/ou disruptivas, até o momento, justamente porque são habilitadoras de diferentes aplicações que dependem de sensores nos diversos domínios. Analisando a lista do MCTI em conjunto com as de tecnologias emergentes e disruptivas, verifica-se que algumas delas são colocadas como capazes de, no tempo presente, alavancar novos produtos e serviços, diminuindo a incerteza e o risco da aplicabilidade.

2.6 Interesse da Defesa

Em 2021, foi publicada, por meio da Portaria GM-MD Nº 3.063, a Política de Ciência, Tecnologia e Inovação de Defesa (BRASIL, 2021a), tendo como objetivo geral estimular o desenvolvimento científico e tecnológico e a inovação de interesse de Defesa. A política estabelece dez objetivos específicos para a área de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) de forma a promover a indústria de Defesa, a formação de recursos humanos e a pesquisa. O texto da Portaria cunha o termo “interesse da Defesa” em todos os objetivos e diretrizes, comunicando de forma clara que os produtos e aplicações tecnológicas para o setor devem ter uma forte característica prática e operacional.

Espera-se, portanto, que deverão seguir em breve novas estratégias de CT&I do Ministério da Defesa e/ou das três Forças componentes. Como referência precedente, em 2003, foi publicada a estratégia de CT&I para a Defesa que também propôs uma lista, à época, com as tecnologias de interesse da Defesa Nacional

(BRASIL, 2003, p. 42). Mesmo sendo uma relação publicada há quase vinte anos, nota-se a presença de tecnologias que ainda hoje são consideradas emergentes, como por exemplo, o voo hipersônico. Outra importante contribuição da Estratégia de CT&I da Defesa de 2003 é relacionar as vinte e duas tecnologias de interesse com uma proposta de áreas de interesse, onde as aplicações são mais bem visualizadas. A **figura 2** apresenta o resultado do cruzamento feito à época, demonstrando, por exemplo, a capacidade habilitadora de algumas tecnologias. Esse mapeamento auxilia o decisor no estabelecimento de prioridades para Gestão de portfólio de projetos de P&D. Pelo cruzamento das áreas e tecnologias componentes, verifica-se que Fusão de Dados era a que mais habilitava aplicações em diversos domínios.

A distinção entre áreas de aplicação e famílias de tecnologias também foi recentemente utilizada por dois países europeus. Em 2019, o Ministério da Defesa do Reino Unido publicou a sua estrutura de tecnologia onde são apresentadas sete famílias de tecnologias, que seguem traduzidas (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2019):

- 1 - materiais avançados;
- 2 - inteligência artificial, aprendizado de máquina e ciência de dados;
- 3 - sistemas autônomos e robótica;
- 4 - energia, armazenamento de energia, conversão e transmissão;
- 5 - sensores;
- 6 - eletrônica avançada e computação; e
- 7 - tecnologias efetoras.

Na sequência, o documento lista nove áreas de aplicações de Defesa, que possuem maior afinidade com os sistemas de emprego militar conhecidos:

- 1 - espaço;
- 2 - plataformas;
- 3 - inteligência, vigilância e reconhecimento abrangentes;
- 4 - logística e suporte modernizados;

- 5 - guerra cibرنética e eletrônica aprimorada;
- 6 - sistemas de armas de próxima geração;
- 7 - comunicações resilientes;
- 8 - aprimoramento humano; e
- 9 - comando e controle de última geração.

Enquanto a primeira lista traz tecnologias até agora listadas como emergentes, disruptivas e habilitadoras, a segunda lista traz uma série de grandes grupos de sistemas para emprego militar. Por exemplo, aplicações espaciais, que podem ser satélites e veículos lançadores, demandam sistemas autônomos, robótica, sensores, eletrônica avançada, entre outras.

Estrutura semelhante foi utilizada pelo Ministério da Defesa da Espanha, quando em 2020, apresentou a sua Estratégia de Tecnologia e Inovação de Defesa (SECRETARIA DE ESTADO DE DEFESA, 2020). Na ocasião, foram definidas onze áreas de interesse da Defesa para P&D:

- 1 - armas e munições;
- 2 - sensores e sistemas eletrônicos;
- 3 - tecnologias comuns para bases e instalações, plataformas e soldados;
- 4 - bases e instalações;
- 5 - plataformas terrestres;
- 6 - plataformas navais;
- 7 - plataformas aéreas;
- 8 - sistemas espaciais;
- 9 - soldado;
- 10 - químico, biológico, radiológico, nuclear e explosivos (QBRNE); e
- 11 - tecnologias de informação, comunicação e simulação.

Duas novas aplicações surgem na proposta espanhola: bases / instalações e tecnologias para o soldado. Com isso, amplia-se o espectro para tratar de funções que não são comumente levantadas em processos de gestão de ciclo de vida de produtos de Defesa, como por exemplo, obras, melhorias de infraestrutura e saúde do combatente. Embora, à primeira vista, possam parecer categorias dissimilares, a inclusão

melhora a percepção de que são áreas com funcionalidades importantes para o atingimento das capacidades operativas.

O caráter aplicado das linhas de pesquisa de interesse da Defesa da Espanha é ilustrado na **figura 3**. As capacidades militares são as que interagem com as necessidades operacionais e o dimensionamento da Força em termos de seus objetivos, trazendo a resposta material para

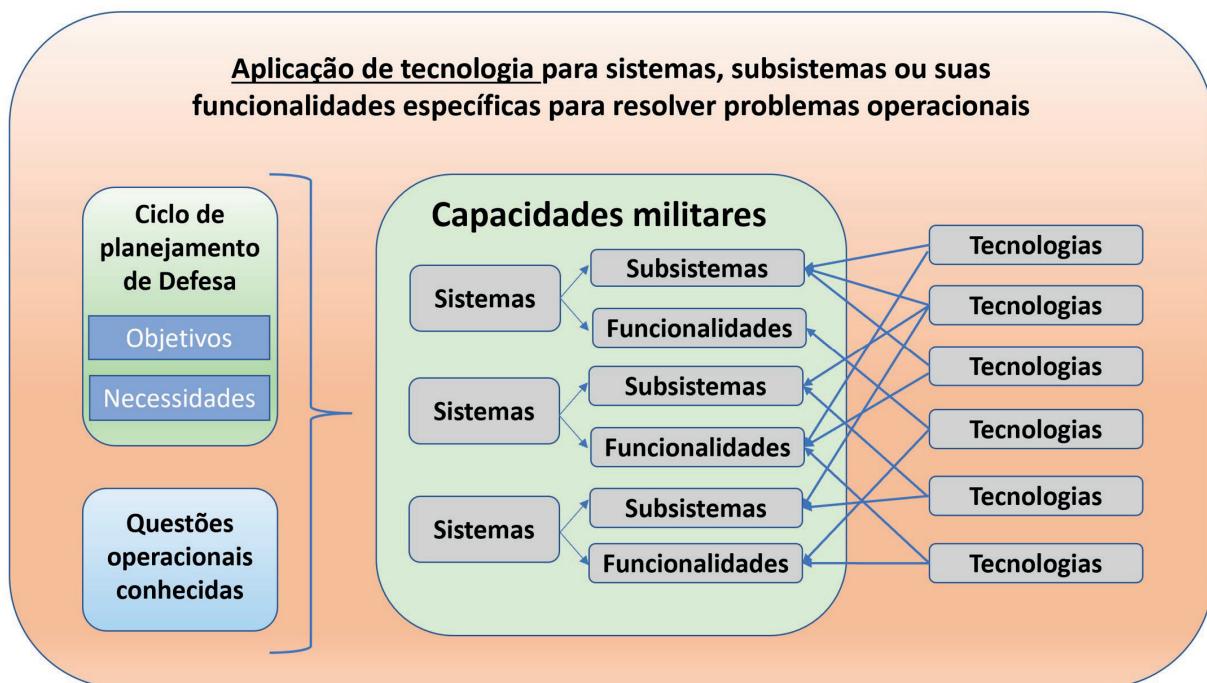
demandas originadas no ciclo de planejamento específico. Todos os sistemas e materiais de emprego militar são compostos de subsistemas que entregam funcionalidades. São neles que aderem as tecnologias componentes, sustentando o desempenho, a funcionalidade e a confiabilidade atuais ou as elevando para novos patamares.

Figura 2 - Mapeamento entre Áreas de Aplicação e Tecnologias.

	Ambiental	Biomédica	Sistemas de Armas	Energia	Espacial	Materiais	Micro e Nano tecnologias	Tecnologia de Informação	Telecomunicações
Fusão de Dados									
Microeletrônica									
Sistemas de Informação									
Radares de Alta Sensibilidade									
Ambiente de Sistemas de Armas									
Materiais de Alta Densidade Energética									
Hipervelocidade									
Potência Pulsada									
Navegação Automática de Precisão									
Materiais Compostos									
Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD									
Sensores Ativos e Passivos									
Fotônica									
Inteligência de Máquinas e Robótica									
Controle de Assinaturas									
Reatores Nucleares									
Sistemas Espaciais									
Propulsão com Ar Aspirado									
Materiais e Processos em Biotecnologia									
Defesa Química, Biológica e Nuclear (QBN)									
Integração de Sistemas									
Supercondutividade									
Fontes Renováveis de Energia									

Fonte: BRASIL (2003, p. 44)

Figura 3 - Relacionamento entre necessidades, capacidades e tecnologias.



Fonte: adaptado de Secretaria de Estado de Defesa, 2020).

2.7 Propósito geral

A capacidade que certa tecnologia tem de alavancar um amplo espectro de inovações em setores da produção e operação é objeto de constante estudo acadêmico e científico. A literatura definiu tecnologias de propósito geral – GPT (*general purposes technologies*, em inglês) para aquelas que são capazes de trazer um retorno em escala e complementariedades que transbordam para diversas áreas de aplicação. Uma das definições para GPT é a que segue:

[...] são caracterizadas pelo potencial de uso generalizado em uma ampla gama de setores e pelo seu dinamismo tecnológico. À medida que uma GPT evolui e avança, ela se espalha por toda a economia, gerando e promovendo ganhos de produtividade generalizados. A maioria das GPTs [sic] desempenha o papel de ‘tecnologias facilitadoras’, abrindo novas oportunidades em vez de oferecer soluções completas e finais. (BRESNAHAN; TRAJTENBERG, 1995), tradução nossa).

São alguns exemplos consagrados de GPT: motor a vapor, eletricidade, semicondutores, o computador pessoal, entre outros. Alguns autores também consideram que a mecanização de sistemas atuou como GPT até meados do século passado, seguido pela atuação da eletrônica, que viabilizou novos produtos, processos e dispositivos. Sobre essa base instalada de sistemas mecânicos e eletrônicos, veio então a automação, onde a teoria de controle de sistemas atuou e ainda atua de forma indispensável para muitas soluções presentes no nosso dia a dia.

Embora essa classificação não seja aplicável somente no escopo da Defesa, ela respalda a proposta de que existe um conjunto de tecnologias que habilitam um número ainda maior de aplicações militares, sendo que a sua correta identificação facilita a priorização e aplicação de recursos para pesquisa e desenvolvimento.

2.8 Sensível

De acordo com Longo e Moreira (2018), tecnologia sensível “é aquela que um determinado país (ou grupo de países) considera que não deva dar acesso, durante certo tempo, hipoteticamente por razões de segurança”. Esse grupo de tecnologias ou de aplicações remete à classificação de tecnologias críticas discutidas no início deste artigo, sendo que essa abordagem traz a perspectiva da nação que não tem o acesso permitido a determinado sistema ou componente. Normalmente, os instrumentos que vêm sendo utilizados para a não-proliferação de determinados tipos de tecnologia são acordos e tratados internacionais. Merecem destaque dois desses instrumentos: o regime de controle de tecnologia de mísseis - *MTCR* (*missile technology control regime*, em inglês); e o tratado de não-proliferação de armas nucleares – *NPT* (*non-proliferation treaty*, em inglês).

O *MTCR* foi estabelecido inicialmente em 1987, por sete países, e teve aumento de adesão nos anos subsequentes, sendo que o Brasil aderiu como participante em 1995. O objetivo principal desse acordo é restringir a circulação, entre os países-membros, de tecnologias que sejam componentes de sistemas não-tripulados que levem cargas úteis a distâncias maiores do que 300 km.

O *NPT* é um tratado formal estabelecido em 1968, ratificado pelo Brasil na década de 1990 (BRASIL, 1995), negando a posse e o desenvolvimento de artefatos atômicos, mas possibilitando o desenvolvimento mútuo das tecnologias nucleares para finalidades pacíficas.

3. Consolidação dos tipos de tecnologia aplicáveis aos Sistemas e Materiais de Emprego Militar

Os tipos de tecnologia apresentados na seção anterior trazem uma ampla

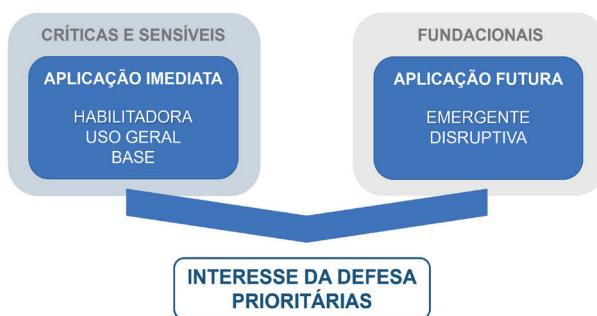
perspectiva do que se deseja obter ou desenvolver para aplicações em Defesa e Segurança. Muitos dos tipos apresentados possuem listas propostas por países ou organizações de Defesa, com o objetivo de comunicar quais seriam as tecnologias que têm prioridade na busca pelo domínio do conhecimento, da concepção, da produção e da operação. Além disso, verifica-se o direcionamento de cada tecnologia com algum sistema potencial de emprego militar, reforçando o aspecto de que é a aplicação de alguma técnica ou método integrado em um subsistema ou sistema maior que conduz a uma solução material para as capacidades operativas.

Como também foi discutido anteriormente, os tipos de tecnologias guardam entre si características semelhantes nos atributos de aplicabilidade, temporalidade e maturidade, o que pode permitir um agrupamento em torno de um conjunto resumido de tipos. Dessa forma, fica facilitada a compreensão, por parte do assessor e do decisor em P&D, de quais categorias necessitam de atenção e de priorização imediata e quais seriam as que requerem investimento de risco a médio e longo prazos. Assim sendo, é possível distinguir tecnologias para aplicação imediata em Defesa e outro grupo para aplicação potencial futura. No primeiro grupo, encontram-se as tecnologias de base / habilitadoras, uma vez que elas sustentam uma série de sistemas reais, e as de uso geral, pela característica de uso generalizado. No grupo de tecnologias futuras, apresentam-se as emergentes, disruptivas e fundacionais, pois todas tratam de potencial futuro de ganho de desempenho e funcionalidade. Dentro do contexto de gerir um portfólio de projetos de P&D, devem ser levadas em consideração as listas de tecnologias críticas e sensíveis como restrições, ou mesmo como elemento para construção daquelas que serão prioritárias e de interesse da Defesa.

A **figura 4** contextualiza cada um dos tipos de tecnologia apresentados. Verifica-se, da seção anterior, que aquelas que hoje são requeridas

para os sistemas de emprego militar já foram classificadas, de uma certa forma, como críticas, o que restringe, consideravelmente, a aquisição no mercado de Defesa de componentes e elementos para compor subsistemas ou sistemas. A classificação categoria de tecnologias fundacionais segue no mesmo sentido de, futuramente, restringir o acesso de técnicas, métodos e processos disruptivos e emergentes. Assim sendo, a escolha de quais tecnologias serão as prioritárias e quais as de interesse da Defesa envolve aquelas de aplicações imediata e futura, dentro de um cenário onde o acesso é restrito, negado ou não permitido por adesão a acordos internacionais.

Figura 4 - Relacionamento entre tipos de tecnologia para aplicação em sistemas de Defesa.



Fonte: elaborado pelos autores (2022)

Em geral, a literatura especializada em tecnologia e gestão de P&D dedica mais tempo para as discussões sobre tecnologias emergentes e disruptivas. Entretanto, a realização de um sistema de emprego militar depende, prioritariamente, de tecnologias maduras para uso no curto prazo. Para as aplicações e utilizações em Defesa, maturidade não é somente a demonstração de funcionalidade de forma isolada, mas a capacidade de integração em um sistema amplo e a de operação em ambiente com condições mais extremas do que aquelas controladas em laboratórios. Para muitas tecnologias de aplicação futura, não existe, ainda, demonstração robusta de capacidade de operação,

apenas firmes promessas de potencialidades. Portanto, uma tarefa importante é identificar qual o conjunto de tecnologias habilitadoras que suportam as aplicações imediatas de Defesa.

Pelas definições apresentadas, as tecnologias habilitadoras, de base e de uso geral, compartilham a mesma característica de suportarem muitas aplicações práticas e inovações de bens, produtos e serviços. Neste trabalho, será utilizada somente o termo habilitadora para o grupo de tecnologias que sirvam como pilares de diversos sistemas de emprego militar. Embora a definição do MCTI, também, englobe tecnologias com potencial futuro, é preferível ter uma categoria que delimita a aplicação, no tempo presente, de tecnologias com grau comprovado de funcionalidade, integração sistêmica e robustez para operação em ambiente real.

Da mesma forma, as características semelhantes e o uso intercambiável das categorias de emergente e disruptiva possibilitam a utilização de apenas um termo para as tecnologias de emprego potencial futuro. O termo emergente será utilizado a partir deste ponto do trabalho para aquelas tecnologias que possuam os atributos de a) novidade radical; b) crescimento relativamente rápido; c) coerência; d) impacto proeminente; e e) incerteza e ambiguidade (ROTOLO; HICKS; MARTIN, 2015). A restrição de acesso, atual e futura, é capturada pelas definições de tecnologias críticas e fundacionais. Pelo fato de que a fundacional é ainda uma possibilidade, serão agrupadas em torno da categoria de tecnologias críticas aquelas sobre as quais alguma nação estabeleça controle de exportação ou negação de uso final.

Em resumo, as tecnologias de interesse para as aplicações de material do Exército Brasileiro serão agrupadas em habilitadoras (aplicação imediata) e emergentes (aplicação potencial futura), dentro de um contexto de negação ou restrição de acesso trazido pela classificação de tecnologias críticas. A priorização dos grupos de

habilitadoras e de emergentes dará então origem à categoria de tecnologias prioritárias do EB.

4. Proposta de tecnologias habilitadoras para o Exército Brasileiro

Foram utilizadas as relações dos diversos tipos de tecnologias aplicadas para a Defesa, apresentadas em seções anteriores, com atenção especial para a MCTL dos EUA e as listas da Austrália, Reino Unido e Espanha, além das relações do Ministério da Defesa, de 2003, e da recente publicada do MCTI. Após um cruzamento da extensa lista resultante com as dez aplicações essenciais, chegou-se à proposta de sete tecnologias habilitadoras para aplicações no EB, que seguem abaixo, em ordem alfabética:

- 1 - acústica;
- 2 - computação avançada e embarcada;
- 3 - energia para mobilidade;
- 4 - fotônica;
- 5 - guiamento e controle;
- 6 - posição, navegação e tempo; e
- 7 - segurança de dados.

O arranjo proposto de tecnologias suporta diversas aplicações essenciais, como, por exemplo, computação avançada e embarcada, praticamente necessária em todas as áreas de aplicações de Sistema e Materiais de Emprego Militar (SMEM). Outra característica fundamental é o elevado grau de maturidade dessas tecnologias no setor de Defesa como um todo, mas que não se reflete necessariamente na disponibilidade em sistemas nacionais, indicando que muitas delas também são críticas. Nota-se, ainda, que computação avançada, embarcada e segurança de dados são pilares tecnológicos no ambiente cibernético, aplicação definida como prioritária neste trabalho.

5. Proposta de tecnologias emergentes para o Exército Brasileiro

Oestabelecimento de um complexo científico-tecnológico, que detenha o conhecimento e aplicação das tecnologias habilitadoras, serve de base para o desenvolvimento de tecnologias emergentes que, futuramente, serão o estado da arte no emprego militar. Pela própria definição apresentada anteriormente, são tecnologias com um grau significativo de coerência em termos de patentes e publicações científicas, além de estarem sendo adotadas em algumas áreas e aplicações.

Da mesma forma, como foi feito para a escolha das tecnologias habilitadoras, foram utilizadas as listas discutidas previamente: da Austrália, fundacional dos EUA, Reino Unido e do MCTI brasileiro, chegando a quinze tecnologias, listadas a seguir em ordem alfabética:

- 1 - análise de dados avançada;
- 2 - armazenamento de energia;
- 3 - biotecnologias;
- 4 - controle de assinaturas;
- 5 - energia dirigida;
- 6 - geração avançada de energia;
- 7 - hipersônica;
- 8 - inteligência artificial;
- 9 - interface de humanos com máquinas;
- 10 - internet das coisas;
- 11 - manufatura avançada;
- 12 - materiais avançados;
- 13 - nanotecnologias;
- 14 - quântica; e
- 15 - sistemas autônomos.

6. Sistemática de classificação e priorização de tecnologias

A seção anterior trouxe a possibilidade de agrupar as tecnologias para aplicações em Defesa como sendo habilitadoras ou emergentes, havendo também a possibilidade

de serem críticas em função da restrição de acesso. Dentro da tarefa de identificar quais são as etapas requeridas para atingir o objetivo de priorizar, é possível tornar as fases tão complexas quanto se queira, correndo o risco de se gerar o efeito oposto: ao se deparar com procedimentos extensos e confusos, o assessor / decisor pode abandonar os critérios propostos e seguir uma linha de atuação mais empírica, anulando o esforço feito para sistematizar a sequência de passos. Portanto, o processo completo precisa ser dividido em fases com atribuições claras e concisas, de modo que a conclusão de uma etapa conduza à próxima de forma direta.

Priorização para maximizar um determinado critério de interesse é um dos objetivos da Gestão de Portfólio de Projetos, cujo escopo é definido por Archer e Ghasemzadeh:

A seleção do portfólio de projetos é a atividade periódica envolvida a partir de projetos disponíveis, propostos e em andamento, que atenda aos objetivos declarados da organização de uma forma desejável, sem exceder os recursos disponíveis ou violar outras restrições (ARCHER; GHASEMZADEH, 1999, tradução nossa).

Segundo os autores, gerir um conjunto de projetos envolve três grandes fases: considerações estratégicas; avaliação individual de projetos; e seleção do portfólio. As duas primeiras fases trazem as perspectivas *Top-Down* e *Bottom-Up*, ao passo que a terceira fase consolida os resultados das análises individuais e das necessidades de mais alto nível. Embora o foco desta seção seja priorizar tecnologias e não projetos, a estrutura conceitual do artigo proporciona uma visão ampla de como deve ser feita a separação e a execução de etapas singulares, quando a realização de uma fase conduz ao início da próxima.

Baseada, também, em três fases, será apresentada, nesta seção, uma proposta de priorização de tecnologias que considera tanto as

demanda operacionais de alto nível, quanto as possibilidades em que cada tecnologia individual pode contribuir. A **figura 5** apresenta, de forma esquemática, as três principais etapas envolvidas no processo completo. O primeiro bloco corresponde ao nível superior da hierarquia de sistemas que, neste caso, corresponde aos SMEM. No segundo bloco, são executadas atividades para avaliar as funcionalidades e potencialidades de cada tecnologia componente e, no terceiro bloco, as duas perspectivas são mescladas por intermédio de priorização e seleção.

Figura 5 - Fases principais do processo de priorização de tecnologias.



Fonte: elaborado pelos autores (2022)

6.1 Aplicações Essenciais de SMEM

A elaboração de uma lista de áreas tecnológicas e aplicações de sistemas e materiais para emprego militar pode ser iniciada a partir das diversas classificações elencadas na seção anterior. De todas as apresentadas, destacam-se as listas do DoD de tecnologias militares críticas, a MCTL, a de aplicações de Defesa do Reino Unido e as áreas e subáreas de interesse da Defesa da Espanha. Realizando uma comparação das três listas frente às capacidades operativas do EB, são identificadas dez áreas / aplicações essenciais de SMEM agrupadas na **tabela 1**.

Em primeiro lugar, é necessário estabelecer a condição temporal dessas aplicações. Ao tomar como base as listas dos EUA, Reino Unido e Espanha, separadas por um período de vinte anos, as áreas sugeridas contemplam uma vasta gama de soluções materiais para o atendimento de problemas operacionais. O primeiro grupo de aplicações atende, justamente,

aos conceitos de soluções materiais clássicos e mecanizados. O segundo grupo incorpora as funcionalidades trazidas pelas tecnologias digitais, predominantes a partir dos anos 1970. O último grupo reflete os desafios operacionais dos novos domínios. Portanto, é possível visualizar que uma determinada Capacidade Operativa seja obtida por meio de um conjunto de aplicações. Tomando, como exemplo, a capacidade operativa “movimento e manobra”, vislumbra-se o emprego de boa parte das aplicações listadas: plataformas; armamento e munição; comunicação; informação; e computação.

O papel das aplicações essenciais de SMEM neste trabalho é fundamental para relacionar as capacidades operativas com as tecnologias. Essa lista representa as áreas nas quais as tecnologias emergentes e habilitadoras serão aplicadas tanto no tempo presente, quanto futuramente.

Tabela 1 - Aplicações e Áreas

APLICAÇÕES	ÁREAS
APLICAÇÕES TRADICIONAIS	1-PLATAFORMAS 2-APERFEIÇOAMENTO DO COMBATENTE 3-INSTALAÇÕES 4-ARMAMENTOS E MUNIÇÃO 5-LOGÍSTICA E SUPORTE
APLICAÇÕES DA ERA DIGITAL	6-COMUNICAÇÃO, INFORMAÇÃO E COMPUTAÇÃO 7-SENSORES E ELETRÔNICA 8-SIMULAÇÃO
APLICAÇÕES CONTEMPORÂNEAS	9-QBRN 10-AMBIENTE CIBERNÉTICO

Fonte: elaborado pelos autores (2022)

No lado esquerdo da **figura 6**, destaca-se o atendimento das capacidades operativas em função das dez aplicações essenciais. No lado direito, ocorrem os processos de escolha, priorização e P&D em tecnologias emergentes e habilitadoras para atender aos sistemas e materiais de emprego militar. Assim, **as áreas de aplicações de SMEM delimitam a amplitude das linhas de pesquisa de interesse do EB**, atuando como o nível mais elevado no qual as prioridades são estabelecidas. Trazendo uma equivalência com a gestão de portfólio de projetos, enquanto as considerações estratégicas

de uma organização orientam os seus projetos, no caso das tecnologias, a orientação advém das áreas de interesse para aplicação.

A proposta das dez aplicações essenciais reflete conceitos modernos de operações militares, em tempo de paz e em eventual conflito ou guerra. É importante compreender que essa lista requer revisões periódicas em função de novas capacidades operativas que venham a surgir. Outrossim, a escolha de uma capacidade operativa como sendo a mais prioritária para o EB conduz a uma prioridade de aplicações essenciais, que irão, por fim, influenciar na priorização das tecnologias habilitadoras e emergentes, demonstrando assim a necessidade de constante revisão e atualização dos elementos da **figura 6**.

Figura 6 - Relação entre capacidades operativas e tecnologias por meio das aplicações essenciais.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

6.2 Avaliação Individual das Tecnologias

A primeira categorização necessária é a de separar as tecnologias nos grupos de habilitadoras e emergentes, sinalizando, também, se são críticas ou potencialmente críticas (fundacionais). Essa sinalização será fundamental na próxima fase, elevando a prioridade para P&D nacional, das tecnologias cujo acesso é restrito ou negado. Essa separação deve ser organizada com base na literatura disponível e discutida na seção anterior. Ainda, ferramentas bibliométricas são recomendadas

de forma a representar a evolução temporal do número de publicações e de patentes.

Em seguida, o nível de maturidade tecnológico é estabelecido com base em escalas consagradas. A primeira delas é a conhecida TRL - *Technology Readiness Level*, utilizada largamente no setor aeroespacial (MANKINS, 1995). A escala TRL corresponde a nove níveis, sendo o mais baixo, TRL 1, representativo de uma tecnologia com resultados preliminares, obtidos em pesquisa básica, alcançando maiores patamares à medida que a tecnologia tem suas funcionalidades demonstradas em ambientes cada vez mais complexos, atingindo TRL 9 quando a tecnologia obtiver status operacional.

A outra proposta vem ao encontro das conceituações apresentadas neste trabalho, distinguindo o sistema completo das suas tecnologias componentes. Sauser et al. (2006) identificaram que a escala TRL mede apenas a maturidade isolada de uma determinada tecnologia, mas não a sua capacidade de se integrar em um sistema completo. O resultado foi fruto do estudo de caso de uma plataforma (sonda da NASA para Marte), em função da declaração de TRL 9 sem um dos elementos ter atingido capacidade integrada de operação. Assim, os autores apresentam o conceito de IRL – *Integration Readiness Level* – de forma a capturar os riscos envolvidos na integração de tecnologias. A tabela 2 apresenta a escala proposta.

Tabela 2 - Escala IRL

IRL	Definição
7	A integração de tecnologias foi verificada e validada com detalhes suficientes para ser acionável.
6	As tecnologias integradoras podem aceitar, traduzir e estruturar informações para a aplicação desejada.
5	Existe controle suficiente entre as tecnologias para estabelecer, gerenciar e encerrar a integração.
4	Há detalhes suficientes na qualidade e garantia da integração entre as tecnologias.
3	Existe compatibilidade (isto é, linguagem comum) entre tecnologias para integrar de forma ordenada, eficiente e interagir.
2	Existe algum nível de especificidade para caracterizar a interação (isto é, capacidade de influenciar) entre tecnologias por meio de suas interfaces.
1	Uma interface (isto é, conexão física) entre tecnologias foi identificada com detalhes suficientes para permitir a caracterização da relação.

Fonte: SAUSER et al., 2006, tradução nossa.

Por fim, a análise individual de cada tecnologia deve levar em consideração a relação entre o custo e o benefício. Avaliar o retorno do investimento empenhado em P&D de tecnologias para emprego militar oferece um grande desafio para a estrutura de governança e gestão. As métricas de desempenho podem variar de uma para outra tecnologia, sendo importante que se tenha um conjunto comum de definições. Por exemplo, o dispêndio realizado ao longo de um desenvolvimento tecnológico deve englobar os custos de capacitação de pessoal, estabelecimento de infraestrutura laboratorial, manutenção de equipamentos, consumíveis, dentre outros. Um TRL igual a 2 significa que existe uma liberdade de ação de P&D nacional para produção de conhecimento em nível de laboratório. Havendo apenas pessoal formado em nível de pós-graduação, não é possível estabelecer que haja TRL 1 para uma determinada tecnologia. Prosseguir para o próximo nível representa obter suporte financeiro, material e de recursos humanos. Uma transição bastante estudada na literatura é quando a tecnologia atinge o TRL 6, mas o capital humano e o material requeridos para atingir o TRL 7 é tão intenso que o desenvolvimento acaba sendo encerrado. Essa lacuna é comumente denominada de “vale da morte” e acaba se tornando um obstáculo para que um desenvolvimento experimental bem-sucedido siga para a indústria e se torne uma inovação.

Em resumo, cada tecnologia deve ser avaliada com respeito aos seguintes fatores:

- a) categorização como habilitadora ou emergente;
- b) categorização como crítica ou fundacional;
- c) nível de maturidade tecnológica – TRL;
- d) nível de maturidade de integração – IRL;
- e) risco de desenvolvimento; e
- f) custo/benefício.

6.3 Priorização das Tecnologias

Nesta terceira e última fase, as aplicações essenciais de SMEM da primeira etapa são mescladas com as avaliações individuais de cada tecnologia, para, então, gerar a lista de tecnologias prioritárias para o Exército Brasileiro. A abordagem *Top-Down* das dez áreas de aplicações de SMEM, que delimitam as linhas de P&D, também auxiliam na ordenação daquelas tecnologias que terão prioridade na alocação de capital humano e material.

Com a publicação recente da Política de Ciência, Tecnologia e Inovação de Defesa (BRASIL, 2021a), estratégias futuras devem propor as tecnologias prioritárias para aplicações da Defesa. Além disso, uma sequência de priorização também foi proposta pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, em 16 de agosto de 2021, por meio da Portaria nº 5.109 (BRASIL, 2021b), que definiu as prioridades, no âmbito daquele Ministério, no que se refere a projetos de pesquisa, de desenvolvimento de tecnologias e inovações para o período compreendido entre os anos de 2021 a 2023.

Para o MCTI, as áreas prioritárias são, na sequência: a) Estratégicas; b) Habilitadoras; c) de Produção; d) para Desenvolvimento Sustentável; e e) para Qualidade de Vida. Sendo a área de tecnologias estratégicas a de maior prioridade, os setores Espacial, Nuclear, Cibernético e Segurança Pública e Fronteiras devem ter seus projetos apresentados em posição de destaque nos portfólios de P&D. No caso do Exército, o ambiente cibernético, área sob sua responsabilidade, conforme estabelece a PND e a END, está incluído como uma das dez aplicações essenciais de SMEM. Desta forma, será considerado que esses documentos, emanados de órgãos da alta administração federal, determinem quais aplicações essenciais são prioritárias.

Da mesma forma, a próxima prioridade será dada para o conjunto de tecnologias que suportem o maior número possível de aplicações,

destacando a classificação de habilitadoras. Caso uma tecnologia habilitadora seja indicada como sendo também crítica, o peso que ela terá para priorização será maior, visto que ela é necessária, mas não pode ser obtida no mercado.

Seis grupos, então, se formam, em ordem decrescente de prioridade:

I) tecnologias críticas para aplicações essenciais e estrategicamente prioritárias;

II) tecnologias para aplicações essenciais e estrategicamente prioritárias;

III) tecnologias críticas e habilitadoras de diversas aplicações essenciais;

IV) tecnologias habilitadoras de diversas aplicações essenciais;

V) tecnologias fundacionais e emergentes; e

VI) tecnologias emergentes.

A **figura 7** resume as principais atividades das três fases envolvidas na priorização de tecnologias.

Considera-se, neste trabalho, que o ambiente cibرنético é a aplicação essencial e de grande prioridade para o EB, uma vez que a operação neste domínio é mencionada em diversos documentos de alto nível da Defesa e CT&I nacionais. Desta forma, no grupo I de tecnologias prioritárias, são relacionadas as tecnologias habilitadoras de computação avançada e embarcada e de segurança de dados, considerando a restrição de acesso a essas tecnologias no mercado de Defesa.

No grupo II, podem ser incluídas as tecnologias emergentes de análise de dados avançada e a inteligência artificial, em função

das potencialidades que poderão trazer às operações no ambiente cibرنético. Para o grupo III, incluem-se as habilitadoras: acústica; fotônica; guiamento e controle; e posicionamento, navegação e tempo; uma vez que a importação de equipamentos relacionados é, frequentemente, objeto de embargo. No grupo IV, seguem as tecnologias de energia para mobilidade.

A possibilidade futura de restrição às tecnologias fundacionais atribui ao Grupo V as emergentes: biotecnologias; hipersônica; interface de humanos com máquinas; manufatura avançada; materiais avançados; quântica; e sistemas autônomos. Finalmente, restando ao Grupo VI as tecnologias: de armazenamento de energia; controle de assinaturas; energia dirigida; geração avançada de energia; internet das coisas; e nanotecnologias. A **figura 8** apresenta o resultado das priorizações de aplicações essenciais, tecnologias habilitadoras e emergentes, partindo da definição de que o ambiente cibرنético é a aplicação essencial de mais alta prioridade do EB.

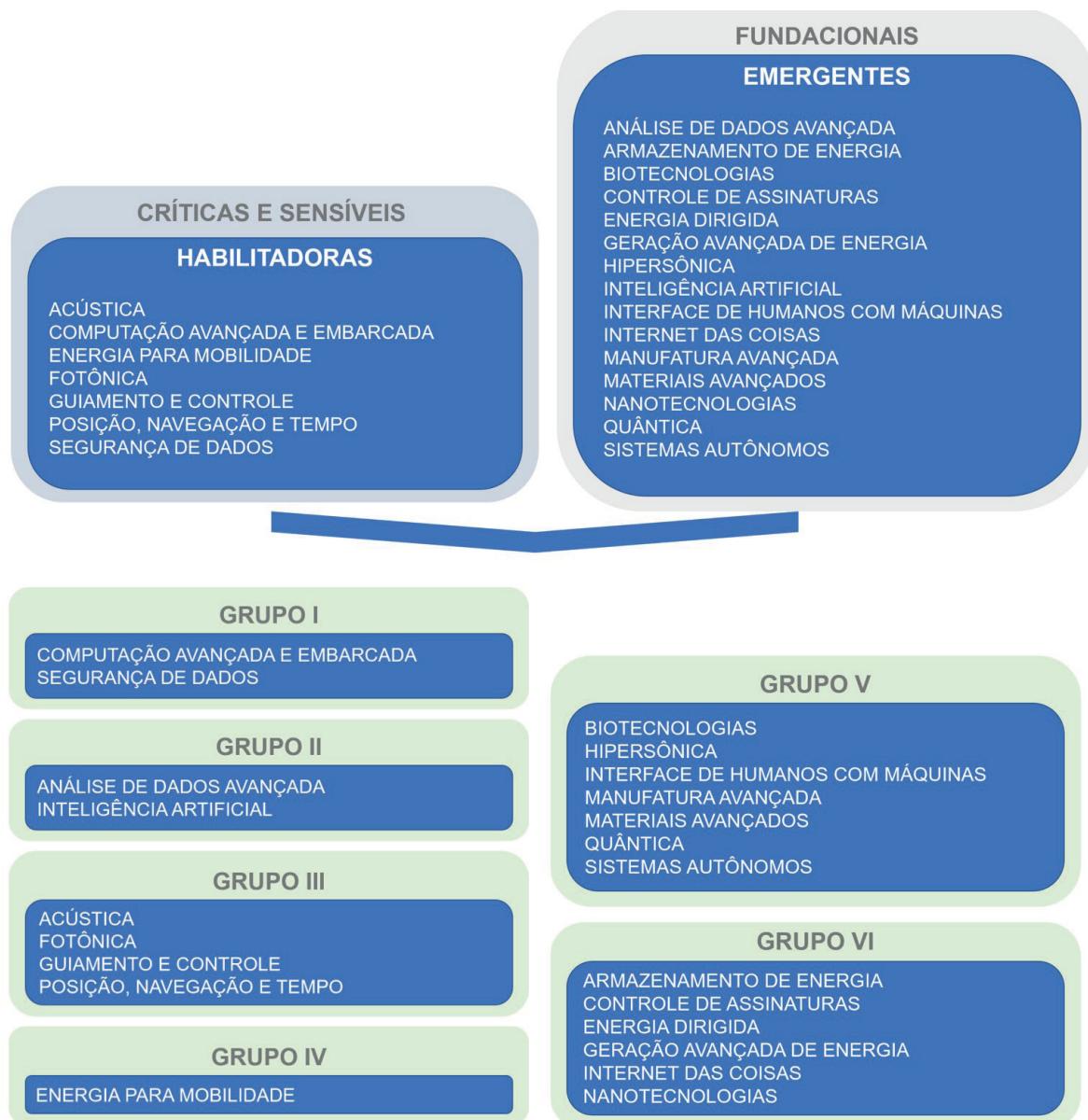
A metodologia de três fases propostas neste capítulo é flexível no sentido de acomodar mudanças de prioridades de SMEM, assim como em incorporar novas tecnologias que certamente emergirão nos próximos anos. Caso, por exemplo, armamentos e munições venham a ser as aplicações essenciais, o Grupo I será alterado de forma a incorporar tecnologias relacionadas a esse tipo de material de emprego militar.

Figura 7 - Fases e atividades do processo de priorização de tecnologias.



Fonte: elaborado pelos autores (2022).

Figura 8 - Proposta de prioridade de tecnologias habilitadoras e emergentes para o EB.



Fonte: elaborado pelos autores (2022).

7. Conclusões e recomendações

A definição de áreas de aplicações de sistemas e materiais de emprego militar, a classificação de tecnologias como habilitadoras ou emergentes e o decorrente processo de priorização, estabelecem uma direção para o planejamento, orçamento e execução de projetos de pesquisa aplicada e de desenvolvimento experimental, podendo conduzir as tecnolo-

gias a estágios elevados de maturidade tecnológica e de integração, facilitando assim a transposição de obstáculos que existem entre a experimentação e transferência para a base industrial de defesa. Ao mesmo tempo que o foco da seleção das tecnologias tem forte apelo para a aplicação real, o interesse com potencial futuro pode ser mantido e sustentado por intermédio da alocação de recursos humanos especializados nas instituições de ensino superior e de pesquisa do Exército Brasileiro.

Dessa forma, vislumbra-se que a aplicação bem-sucedida das tecnologias relacionadas neste trabalho conduzirá a sistemas de emprego militar compostos de: redes íntegras, robustas e resilientes de sensoriamento e de comunicações; sistemas autônomos nas diversas camadas de decisão de uma operação, eventualmente chegando ao nível das plataformas e de seus sistemas críticos; novas formas de geração e armazenamento de energia para funções logísticas e para a mobilidade nos diversos domínios, abandonando a grande dependência de combustíveis tradicionais; uso intensivo de serviços prestados por plataformas orbitais, como posicionamento, imageamento e comunicações; computação intensiva e em tempo real para processamento de dados de sensoriamento e de comunicações, utilizando técnicas de inteligência artificial; e integração operacional e tática entre seres humanos e máquinas. Sugere-se, então, que trabalhos futuros sejam direcionados para a concepção doutrinária de emprego desses sistemas, antecipando as possibilidades e os desafios do teatro futuro de operações.

Referências

ARCHER, N.; GHASEMZADEH, F. *An integrated framework for project portfolio selection*. International Journal of Project Management, v. 17, n. 4, p. 207–2016, 1999.

BOWER, J. L.; CHRISTENSEN, C. M. *Disruptive Technologies: Catching the Wave*. Harvard Business Review, p. 43–53, 1995.

BRASIL. Casa Civil. Lei nº 9.112, de 10 de outubro de 1995. Dispõe sobre a exportação de bens sensíveis e serviços diretamente vinculados. Brasília, DF, 1995. BRASIL. Ministério da Defesa.

Concepção Estratégica: Ciência, Tecnologia e Inovação de Interesse da Defesa Nacional. Brasília, DF, 2003.

BRASIL. Portaria GM-MD nº 3.063, de 22 de julho de 2021. Aprova a Política de Ciência, Tecnologia e Inovação de Defesa. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 158, n. 141, p. 13-14, 28 jul. 2021.

Fabio Andrade de Almeida
Idunalvo Mariano de Almeida Júnior

BRASIL. Portaria MCTI nº 5.109, de 16 de agosto de 2021. Define as prioridades, no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, no que se refere a projetos de pesquisa, de desenvolvimento de tecnologias e inovações, para o período 2021 a 2023. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 158, n. 155, p. 5, 17 ago. 2021.

BRASIL. Portaria MCTI nº 5.365, de 2 de dezembro de 2021. Dispõe sobre a Política de Desenvolvimento Científico, Tecnológico e Inovação para Tecnologias Habilidadoras, no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 158, n. 228, p. 9-10, 6 dez. 2021.

BRESNAHAN, T. F.; TRAJTENBERG, M. General purpose technologies ‘Engines of growth’? *Journal of Econometrics*, v. 65, n. 1, p. 83–108, 1995.

BUREAU DE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SEGURANÇA (EUA). *Review of Controls for Certain Emerging Technologies*. Federal Register: EUA, n. RIN 0694-AH61, p. 58201–58202, nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE DEFESA (EUA). *DoDI 2040.02: International Transfers of Technology, Articles, and Services*. Washington, 2017.

DEPARTAMENTO DE DEFESA (EUA). *DoDI 3020.46: The Militarily Critical Technologies List (MCTL)*. Washington, 2018.

DEPARTAMENTO DE DEFESA (EUA). *Militarily Critical Technologies*. Washington, 2001.

EKELHOF, M.; PAOLI, G. P. *The human element in decisions about the use of force*. Genebra, 2020. Disponível em: <<https://unidir.org/publication/human-element-decisions-about-use-force>>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ESCRITÓRIO DA CONTROLADORIA-GERAL (EUA). *GAO 21-258: DoD Critical Technologies*. Washington, 2021.

GABINETE DO PRIMEIRO-MINISTRO (AUSTRÁLIA). *Protecting and promoting Critical Technologies*. [S. l.], 2021.

GOVERNO DA AUSTRÁLIA. *List of critical technologies in the national interest*. [S. l.], 2021.

LELE, A. *Disruptive Technologies for the Militaries and Security*. Singapore: Springer Singapore, 2019. v. 132.

LI, M.; PORTER, A. L.; SUOMINEN, A. Insights into relationships between disruptive technology/innovation and emerging technology: A bibliometric perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 129, p. 285–296, 2018.

LONGO, W. P.; MOREIRA, W. de S. O acesso a “tecnologias sensíveis.” *Tensões Mundiais*, v. 5, n. 9, p. 73–122, 2018.

MANKINS, J. C. *Technology Readiness Level - A White Paper*.[S.l.:s.n.],1995. Disponível em:<<https://www.researchgate.net/publication/247705707>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

MINISTÉRIO DA DEFESA (Reino Unido). *Defence Technology Framework: Defence Science and Technology*. Londres, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/defence-technology-framework>>. Acesso em: 6 abr. 2022.

ROTOLO, D.; HICKS, D.; MARTIN, B. R. What is an emerging technology? *Research Policy*, v. 44, n. 10, p. 1827–1843, 2015.

SAUSER, B. et al. From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels. 2006, Los Angeles. *Conference on Systems Engineering Research*. Los Angeles: 2006. p. 1–10.

SECRETARIA DE ESTADO DE DEFESA (Espanha). *Defence Technology and Innovation Strategy (ETID) 2020*. Madrid, 2020. Disponível em: <https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/e/t/etid_2020_ingles.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2022.

SERVIÇO DE PESQUISA DO CONGRESSO (EUA). *Defense Primer: Emerging Technologies*. Washington, 2021.