

A customização de processos de avaliação de prontidão tecnológica baseados na escala TRL: desenvolvimento de uma metodologia para o Exército Brasileiro

The customization of technology readiness assessment processes based on the TRL scale: development of a methodology for the Brazilian Army

Resumo: A Avaliação de Prontidão Tecnológica (APT) baseada na escala TRL é um processo que visa minimizar problemas na definição do estágio de maturação de tecnologias, bem como proporcionar uma comunicação eficiente entre especialistas, gestores e outras partes interessadas em organizações que adquirem produtos e sistemas de alto nível tecnológico. Nesse contexto, o trabalho analisa a customização do processo de APT sob a perspectiva de uma organização focal. Para tanto, utiliza-se como estudo de caso o DCT (Departamento de Ciência e Tecnologia), organização focal de uma rede de desenvolvimento de tecnologias e produtos de defesa no âmbito do Exército Brasileiro (EB). Os dados coletados foram provenientes da revisão bibliográfica (estudo de customizações feitas por organizações de referência nos cenários nacional e internacional) e de dados empíricos oriundos de programas do DCT. De posse desses dados, foi possível propor uma metodologia de enquadramento na escala TRL customizada para as especificidades do EB.

Palavras-chave: gestão da inovação; engenharia de sistemas; prontidão tecnológica; TRL; Exército Brasileiro.

Abstract: Technology Readiness Assessment (TRA) based on the TRL scale is a process that aims to minimize problems in defining the stage of maturation of technologies, as well as providing efficient communication between specialists, managers and other stakeholders in organizations that acquire high-tech products and systems. In this context, the work analyzes the customization of the APT process from the perspective of a focal organization. To this end, the DCT (Department of Science and Technology) is used as a case study. The DCT is the focal organization of a network for the development of defense technologies and products within the scope of the Brazilian Army. The data collected came from the literature review (study of customizations made by reference organizations in the national and international scenarios) and from empirical data from DCT programs. With these data, it was possible to propose a customized methodology for the specificities of the Brazilian Army.

Keywords: innovation management; systems engineering; technology readiness; TRL; Brazilian Army.

Rômulo Girardi 

Exército Brasileiro.
Instituto Militar de Engenharia (IME).
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
romullogirardi@ime.eb.br

José Adalberto França Junior 

Exército Brasileiro. Agência de Gestão e
Inovação Tecnológica (AGITEC).
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
adalberto.franca@eb.mil.br

Juraci Ferreira Galdino 

Exército Brasileiro.
Instituto Militar de Engenharia (IME).
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
galdino.juraci@eb.mil.br

Recebido: 26 mai. 2022

Aprovado: 24 ago. 2022

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

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

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



1 Introdução

A Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de produtos de alta tecnologia é frequentemente caracterizada pela integração de novos componentes e subsistemas que se encontram no estado da arte, o que acarreta grande complexidade e um alto grau de incerteza durante as fases iniciais do desenvolvimento tecnológico (DAVIES *et al.*, 2011; MÖLLER; HALINEN, 2017).

Adicionalmente, nessas fases iniciais, é mais desafiador avaliar, com precisão, o estágio de evolução de novas tecnologias e o nível de maturidade adequado para integrá-las, a fim de conceber um novel produto (OLECHOWSKI *et al.*, 2020). A despeito dessas dificuldades, essas avaliações são importantes, pois a integração de componentes e subsistemas ainda imaturos pode provocar aumento de custos e dilação de prazos em programas e projetos de pesquisa e desenvolvimento de produtos de alta tecnologia (UNITED STATES, 2015). Além disso, tanto a implantação quanto a evolução de tais programas e projetos, geralmente, dependem de decisões de gestores desprovidos de conhecimentos técnicos especializados. Nesse contexto, as percepções sobre maturação tecnológica por atores de formações distintas tendem a ser difusas, dificultando o entendimento comum sobre o estágio de evolução das tecnologias envolvidas na concepção do produto almejado (SALAZAR; RUSSI-VIGOYA, 2021).

Visando mitigar os problemas de estimação do estágio de maturação e da comunicação eficiente desses estágios entre especialistas, gestores e outras partes interessadas nas atividades de P&D, a NASA desenvolveu, em meados de 1970, a escala de prontidão tecnológica, do termo em inglês *Technology Readiness Level* (TRL), que padronizou a maturação de tecnologias em nove níveis de prontidão (MANKINS, 2009).

As atividades de P&D da NASA geralmente objetivam produtos de altíssima complexidade, que envolvem muitos componentes customizados e que são produzidos em poucas unidades (às vezes uma única unidade), como telescópios de longo alcance e foguetes espaciais.

Essas características são típicas de Sistemas de Produtos Complexos (CoPS, do termo em inglês *Complex Product Systems*) (HOBDDAY, 1998), que se diferenciam de produtos produzidos em massa, ou commodities. Cabe mencionar que a natureza dos produtos e a cultura organizacional da NASA foram consideradas no desenvolvimento da escala TRL. Dessa forma, outras organizações centrais com os problemas assemelhados aos da NASA, mas que lidam com objetos de P&D de naturezas distintas e que possuem culturas organizacionais díspares, passaram a customizar o processo de Avaliação de Prontidão Tecnológica (APT) de acordo com seus diferentes contextos. Como exemplo de organizações que adotaram essa abordagem podem ser citados o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD, do termo em inglês *Department of Defense*) (UNITED STATES, 2009), o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DoE, do termo em inglês *Department of Energy*) (UNITED STATES, 2011), a Agência Espacial Europeia (ESA, do termo em inglês *European Space Agency*) (ESA, 2017) e, no Brasil, o DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial) (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) e a AEB (Agência Espacial

Brasileira) (XAVIER et al., 2020). Essas organizações focais se caracterizam por interagirem em uma enorme rede de negócios e de pesquisas científicas, composta por pequenas, médias e grandes empresas, órgãos de fomento, universidades, centros de pesquisa etc.

Malgrado a existência de diferentes processos de avaliação TRL customizados, até onde concerne o conhecimento dos autores, não existem estudos que demonstrem como a customização desses processos pode ser realizada. Portanto, de forma a preencher essa lacuna da literatura especializada, esse artigo tem o objetivo de explorar o processo de APT em organizações focais de uma rede de negócios e pesquisa científica que desenvolvem produtos de alta tecnologia. Como questão de pesquisa, o estudo se propõe a responder: **como customizar o processo de APT sob a perspectiva de uma organização focal?**

Para tanto, utilizou-se como estudo de caso o DCT (Departamento de Ciência e Tecnologia), organização focal de uma rede de desenvolvimento de tecnologias e produtos de defesa no âmbito do Exército Brasileiro (EB), que, ao servir de base para a referida questão de pesquisa, possibilitou, adicionalmente, a criação de uma metodologia customizada para as especificidades do EB.

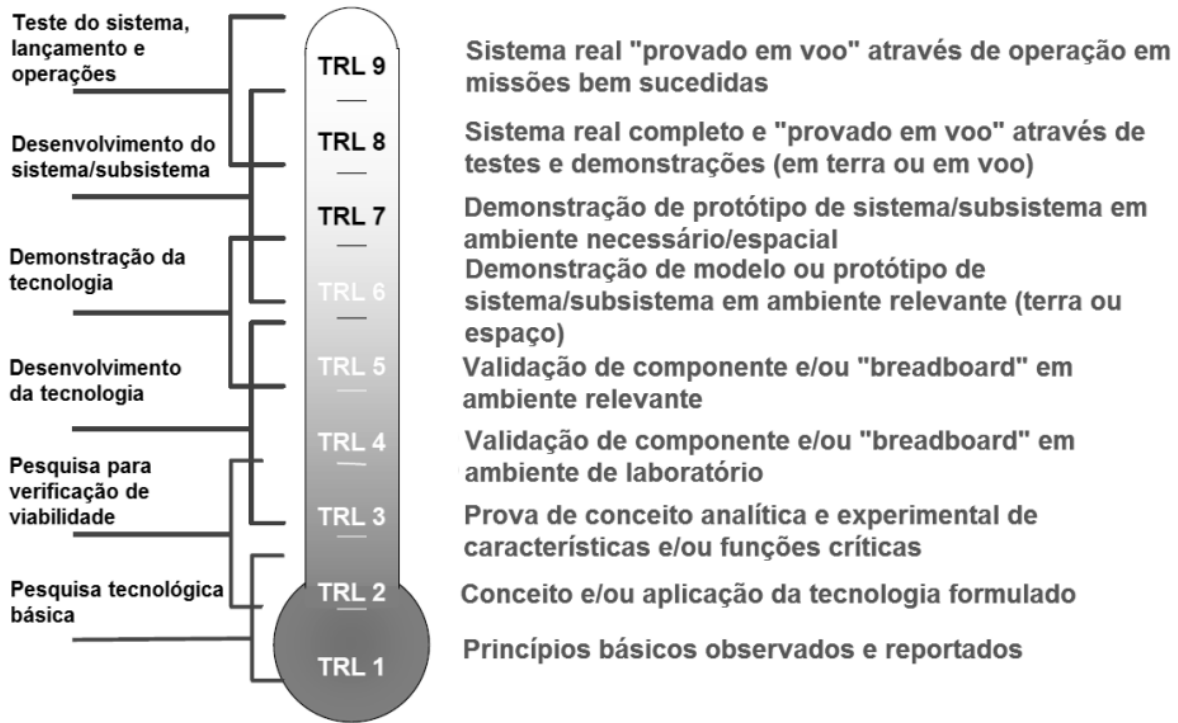
O restante deste artigo está assim organizado: a Seção 2 apresenta um referencial bibliográfico sobre o processo de APT baseado na escala TRL e questões da cultura organizacional e de inovação que impactam o processo. A Seção 3 aborda os aspectos gerais metodológicos utilizados na pesquisa. Na Seção 4, detalha-se a metodologia de enquadramento na escala TRL customizada para o EB. A Seção 5 discute os resultados. Por fim, as considerações finais do estudo são postas na Seção 6. Cabe-se destacar que o Apêndice traz um glossário com a definição dos termos utilizados na metodologia descrita na Seção 4.

2 Referencial bibliográfico

2.1 O processo de APT baseado na escala TRL

A fim de mensurar a prontidão tecnológica no desenvolvimento de sistemas espaciais, foi criada a ferramenta TRL. Desenvolvida em meados de 1970 pela NASA, essa ferramenta fornece uma medida relativa ao estado de uma nova tecnologia em relação ao seu uso para futuros sistemas espaciais. Ela foi organizada em 9 (nove) níveis de prontidão, como mostrado na Figura 1 (MANKINS, 2009).

Figura 1 – Escala de prontidão tecnológica



Fonte: Mankins (2009).

A adoção da escala TRL e de um conjunto criterioso de procedimentos para inferir sobre o nível de prontidão podem se constituir em um mecanismo de interação impessoal, na medida em que estabelece uma linguagem comum e identifica marcos críticos do processo de maturação tecnológica (SAUSER *et al.*, 2010). Dessa forma, melhorando a comunicação entre atores de uma rede complexa estabelecida para desenvolver projetos de P&D em colaboração (SAUSER *et al.*, 2010), evitando falsas expectativas sobre o estágio de desenvolvimento e minimizando riscos na integração de sistemas (GRANT, 1996).

Existem outras escalas, mas a que tem sido utilizada com mais frequência para comunicar sistematicamente o nível de maturidade de tecnologias a serem incorporadas em produtos e sistemas é a TRL (UNITED STATES, 2020a).

Por esse motivo, ao longo do tempo, organizações desenvolveram metodologias de enquadramento na escala TRL a fim de atender suas necessidades específicas (JEAN; LE MASSON; WEIL, 2015) e criaram procedimentos próprios para a APT. Por exemplo, o U.S. *Government Accountability Office* (GAO), órgão do Poder Legislativo responsável por serviços de auditoria, avaliações e investigações de contas públicas do governo dos Estados Unidos, estabelece um guia com os seguintes cinco passos para a condução de processos de APT:

- 1) Estruturar um plano de APT no contexto de um programa ou projeto de obtenção:** definição da metodologia de enquadramento na escala TRL a ser utilizada, definição de pontos de APT ao longo do ciclo de vida (marcos decisórios), definição da equipe de APT e seu papel em cada um dos marcos decisórios (propósito das avaliações, valores de referência, possíveis caminhos após as avaliações etc.);
- 2) Identificar as tecnologias críticas:** a criticidade tecnológica possui definições e critérios próprios, de acordo com o contexto da organização;
- 3) Avaliar as tecnologias críticas:** avaliação do nível de maturidade das tecnologias críticas com base na metodologia de enquadramento na escala TRL;
- 4) Elaborar um relatório de APT:** consolidação dos resultados obtidos durante a avaliação das tecnologias críticas; e
- 5) Usar os resultados do relatório de APT:** análise e utilização dos dados do relatório na elaboração de um plano de maturação de tecnologias (UNITED STATES, 2020a).

Esse guia do GAO mostra que a escala TRL é a ferramenta que embasa todo o processo de APT. Tal percepção justifica a constatação de que a customização do processo de APT sob a perspectiva de uma organização focal se inicia na customização da metodologia de enquadramento na escala TRL. Esse foi o caminho trilhado pelo DoD (UNITED STATES, 2009), DoE (UNITED STATES, 2011), ESA (ESA, 2017) e, no Brasil, pelo DCTA (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) e AEB (XAVIER *et al.*, 2020).

Buscando adequar a escala TRL original às características de seus programas e projetos de obtenção, o DoD desenvolveu uma metodologia de enquadramento na escala TRL para avaliar a maturidade de tecnologias críticas (CTEs, do termo em inglês *Critical Technology Elements*) em sistemas de *hardware e software*. Além disso, o Departamento também possui uma metodologia para a área biomédica desenvolvida pelo *United States Army Medical Research and Materiel Command* (USAMRMC). O DoD alia o emprego de sua metodologia com a gestão de ciclo de vida de sistemas de defesa, uma vez que define níveis TRL de referência para dois marcos decisórios.

- **Marco decisório B (*Milestone B*):** marca o fim da fase de maturação tecnológica e redução de riscos. Ao final dessa fase, é esperado que todas as tecnologias críticas tenham sido demonstradas em ambiente relevante (TRL 6);

- **Marco decisório C (*Milestone C*):** marca o fim da fase de desenvolvimento de engenharia e de manufatura. Ao final dessa fase, é esperado que todas as tecnologias críticas tenham sido demonstradas em ambiente operacional (TRL 7) (UNITED STATES, 2009).

Com o intuito de simplificar a determinação do nível TRL apropriado para uma tecnologia, o AFRL (*Air Force Research Laboratory*), organização enquadrada no organograma do DoD, desenvolveu uma calculadora que estabelece etapas específicas que devem ser cumpridas para cada nível da escala de prontidão tecnológica. Essa ferramenta contempla a avaliação de três tipos de elementos de sistemas: componentes de *hardware*, componentes de *software* e componentes com *hardware* e *software* combinados. A utilização da calculadora é realizada em duas etapas. Na primeira, aplica-se um conjunto de nove perguntas para estimativa inicial do nível TRL da tecnologia. Na segunda, utiliza-se um questionário detalhado para confirmar se o nível TRL estimado previamente é adequado. Caso a confirmação não se concretize, refaz-se o procedimento com o nível TRL imediatamente inferior. Durante a avaliação, são apresentadas, no máximo, 58 (cinquenta e oito) perguntas ao avaliador (NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003).

Na esteira do DoD, o DoE fez adaptações na metodologia de enquadramento na escala TRL para dar maior enfoque à análise de riscos na área energética. A verificação e validação de Estruturas, Sistemas e Componentes de Segurança (SSCs, do termo em inglês *Safety Structures, Systems and Components*) foram incorporadas na metodologia como forma de mitigar riscos tanto para os trabalhadores do setor quanto para o público em geral. Para operacionalizar a identificação do nível TRL de uma tecnologia, o Departamento faz uso de uma calculadora TRL própria. Essa ferramenta segue o processo em duas etapas (estimação preliminar e confirmação do nível de maturidade), nos moldes da calculadora do DoD. Durante a avaliação, são apresentadas, no máximo, 44 (quarenta e quatro) perguntas ao avaliador (UNITED STATES, 2011).

No contexto europeu, a ESA customizou a metodologia de enquadramento na escala TRL para três segmentos distintos: sistemas espaciais, sistemas terrestres e sistemas baseados em *software* (ESA, 2020). Além disso, a Agência busca aliar sua metodologia com as fases do ciclo de vida de seus projetos e com a elaboração de *roadmaps* tecnológicos. O nível TRL 6 é adotado como requisito mínimo para a entrada na fase de integração de tecnologias (ESA, 2017).

No cenário brasileiro, Rocha, Melo e Ribeiro (2017) apresentam a customização realizada no âmbito do DCTA. Buscando adaptar a escala TRL original ao contexto aeroespacial brasileiro, foi desenvolvida a metodologia TRL IAE-ITA e sua respectiva calculadora. A ferramenta consiste em um questionário com 89 (oitenta e nove) perguntas divididas nos seguintes 5 (cinco) quesitos:

- **NBR ISO 16290: 2015:** *checklist* da norma brasileira de definição de níveis de maturidade tecnológica para sistemas espaciais (ABNT, 2015);
- **Tecnológicos:** pertinentes à confirmação da descrição da NBR ISO 16290:2015;
- **Econômicos:** abordam análise de risco e desenvolvimento do projeto (cronograma, orçamento etc.);
- **Político-legais:** relacionados à viabilidade de desenvolvimento, possibilidade de embargos de desenvolvimento e questões legais; e
- **Documentais:** relacionados à gestão do conhecimento, que deve ser documentado, para possível reprodução (ROCHA; MELO; RIBIERO, 2017).

Seguindo abordagem similar, a AEB desenvolveu uma calculadora TRL denominada IMATEC, para apoiar decisões na gestão do Programa Espacial Brasileiro, mais especificamente do Programa Nacional de Atividades Espaciais. A Agência customiza a ferramenta TRL para a utilização em conjunto com a Estrutura Analítica do Produto (PBS, do termo em inglês *Product Breakdown Structure*). Criar uma PBS e avaliar o nível de maturidade de todos os componentes de um produto tecnológico permite estimar, de forma exaustiva, o risco em um determinado estágio de desenvolvimento, tendo em vista que o grau de prontidão de um elemento da PBS será o menor índice TRL de qualquer um de seus elementos constituintes. Dentro dessa perspectiva, os componentes da PBS de menor índice TRL são chamados de “gargalos de risco” do produto, pois propagam seus baixos índices de maturidade tecnológica para os elementos enquadrantes na árvore hierárquica da PBS. Na avaliação do nível TRL de um componente da PBS, a calculadora apresenta perguntas de forma incremental. Ao se responder positivamente a todas as perguntas de um nível, seguem-se as perguntas do próximo nível. Esse procedimento é realizado até que seja estimado o nível TRL. Durante a avaliação de cada componente da PBS, são apresentadas, no máximo, 14 (quatorze) perguntas ao avaliador (XAVIER *et al.*, 2020).

Em síntese, diversas organizações criam seus métodos de APT de acordo com suas necessidades específicas, sem, no entanto, modificar a essência da escala TRL original. Pela análise realizada, verifica-se que esses processos de customização da metodologia de enquadramento na escala de prontidão tecnológica levaram em consideração dois fatores fundamentais: adequação à cultura organizacional e desenvolvimento de calculadora.

- **Adequação à cultura organizacional:** a customização depende da cultura organizacional da rede de negócios a qual a organização focal pertence e de seus macroprocessos de gestão tecnológica. Por exemplo, enquanto o DoD enquadra a APT dentro do ciclo de vida de seus sistemas (UNITED STATES, 2009), o DCTA se preocupa com questões relacionadas a assuntos tecnológicos, econômicos, documentais e político-legais (ROCHA; MELO; RIBIERO, 2017). Além disso, em que pese a adoção de algumas áreas de conhecimento, como engenharia de sistemas, cada organização possui procedimentos diferentes relacionados a planejamento, gestão de requisitos, P&D, testes, avaliação e certificação, fatores esses que impactam diretamente no processo de APT.
- **Desenvolvimento de calculadora:** durante a análise dos processos de customização pelas organizações focais estudadas, foi verificado que o desenvolvimento da metodologia costuma ser acompanhado pelo desenvolvimento de uma calculadora. Em contraste com avaliações não padronizadas, uma calculadora composta por um conjunto padrão de perguntas simplifica a determinação do nível TRL apropriado para uma tecnologia, bem como provê repetibilidade e consistência ao processo (UNITED STATES, 2020a). A avaliação não padronizada do estágio de prontidão de uma tecnologia costuma conduzir a discrepâncias entre o nível TRL percebido por diferentes partes envolvidas em um projeto (ALTUNOK; CAKMAK, 2010; FRERKING; BEAUCHAMP, 2016; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2022; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003)

O Quadro 1 resume as principais customizações realizadas pelas organizações focais analisadas, de acordo com os dois fatores elencados.

Quadro 1 – Principais customizações da metodologia de enquadramento na escala TRL realizadas por organizações focais que adquirem produtos e sistemas de alta tecnologia

Organização focal	Adequação à cultura organizacional	Desenvolvimento de calculadora
DoD	<ul style="list-style-type: none"> • Adequação à gestão de programas e projetos de obtenção de sistemas de defesa; • Metodologia para avaliar a maturidade de tecnologias críticas em sistemas de <i>hardware</i>, <i>software</i> e na área biomédica; • Alia o emprego da escala de prontidão tecnológica à gestão de ciclo de vida dos sistemas de defesa, definindo níveis TRL de referência para dois marcos decisórios (TRL 6 para o <i>Milestone B</i> e TRL 7 para o <i>Milestone C</i>). 	Calculadora TRL da AFRL com processo em 2 etapas (estimação preliminar e confirmação do nível de maturidade). Ferramenta com o número máximo de 58 perguntas.
DoE	<ul style="list-style-type: none"> • Adequação à gestão de projetos na área de energia; • Enfoque na análise de riscos; • Incorpora a verificação e validação de Estruturas, Sistemas e Componentes de Segurança. 	Calculadora TRL própria com processo em 2 etapas (estimação preliminar e confirmação do nível de maturidade). Ferramenta com o número máximo de 44 perguntas.
ESA	<ul style="list-style-type: none"> • Adequação a sistemas aeroespaciais no contexto europeu; • Metodologia para três segmentos distintos: sistemas espaciais, sistemas terrestres e sistemas baseados em <i>software</i>; • Alia o emprego da escala de prontidão tecnológica com as fases do ciclo de vida dos projetos e com a elaboração de <i>roadmaps</i> tecnológicos; • O nível TRL 6 é adotado como requisito mínimo para a entrada na fase de integração de tecnologias. 	O desenvolvimento/emprego de calculadora não é reportado.
DCTA	<ul style="list-style-type: none"> • Adequação à norma brasileira NBR ISO 16290:2015; • Insere questões relacionadas a assuntos tecnológicos, econômicos, documentais e político-legais. 	Calculadora TRL IAE-ITA, ferramenta com 89 perguntas divididas em 5 quesitos (NBR ISO 16290:2015, tecnológicos, econômicos, documentais e político-legais).
AEB	<ul style="list-style-type: none"> • Adequação a sistemas espaciais no contexto do Programa Espacial Brasileiro; • Alia a metodologia de enquadramento na escala TRL com a PBS; • Enfoque na análise de riscos de projetos ligados ao desenvolvimento de produtos de alta tecnologia. 	Calculadora TRL IMATEC, ferramenta com o número máximo de 14 perguntas para a avaliação de cada um dos componentes da PBS.

Fonte: Os autores (2022).

2.2 Aspectos da cultura organizacional e de inovação que impactam o processo

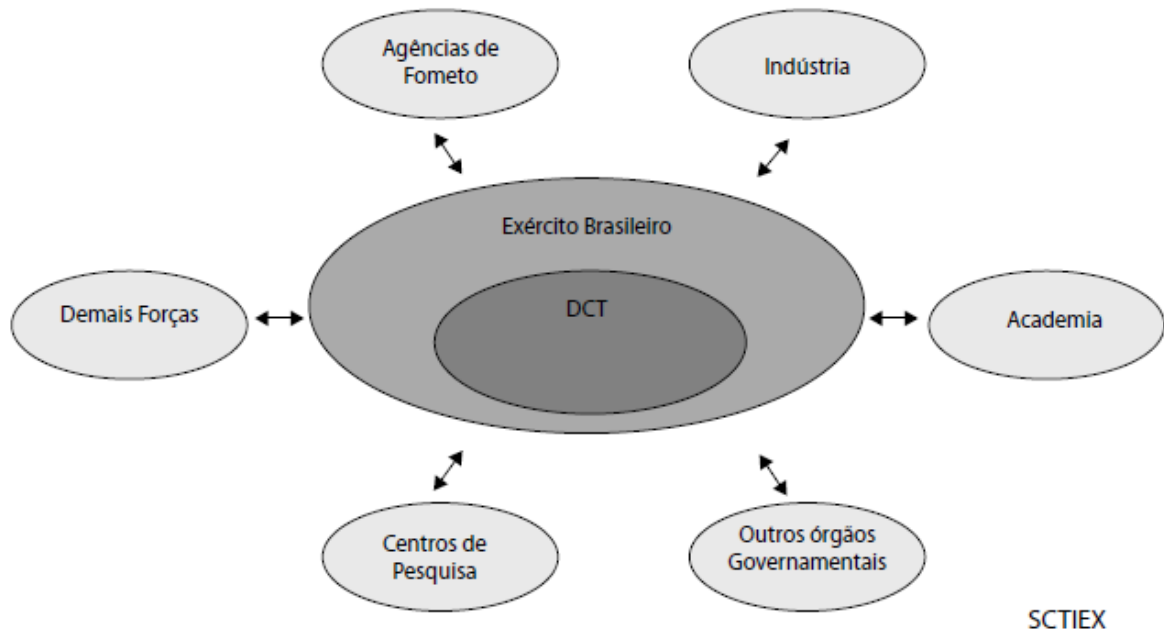
O conceito de cultura organizacional se refere aos valores compartilhados, às crenças, à nomenclatura, aos rituais, à história, às tradições intelectuais e operacionais, ao orgulho pelas realizações, às políticas e práticas, às regras de conduta, à filosofia e a outros aspectos que definem uma organização (GAYNOR, 2002). A cultura organizacional é concebida como um conjunto de valores e pressupostos básicos expressos em elementos simbólicos que, em sua capacidade de ordenar, atribuir significados e construir a identidade organizacional, agem como elemento de comunicação e consenso (FLEURY; FISCHER, 1989).

Essa busca pela comunicação precisa e consenso no ambiente de organizações tem sido abordada na literatura da teoria organizacional em diferentes contextos, focando, direta ou indiretamente, em mecanismos que contribuem para aumentar o entendimento comum (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019). Promover a comunicação, integrar conhecimentos tácitos e entender diferentes perspectivas em redes complexas compostas por atores com formações e experiências diversificadas são problemas enfrentados por organizações encarregadas de gerenciar e realizar atividades de P&D de produtos e sistemas de alta tecnologia (DAVIES et al., 2011).

Segundo Schons, Prado Filho e Galdino (2022), estudos realizados no âmbito do EB têm sugerido que é imperioso desenvolver a capacidade de realizar atividades de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) em complexas redes colaborativas de abrangência nacional para fortalecer os vínculos entre academia, indústria e governo (hélice tríplice) (ETZKOWITZ; ZHOU, 2017) e empreender um modelo de inovação aberta (CHESBROUGH, 2003) em substituição ao modelo tradicional de inovação fechada.

Nesse contexto, o Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação do Exército (SCTIEx), elemento fulcral do setor de defesa brasileiro, apresenta-se como um vetor fundamental no processo de transformação do EB (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019).

Para as fases de concepção, planejamento e P&D do ciclo de vida de material militar, o EB possui procedimentos, atividades, metodologias, nomenclaturas, normas e instruções específicas de sua cultura organizacional que acabam sendo compartilhadas por todo o SCTIEx (LIMA, 2007). A Figura 2 ilustra a estrutura do SCTIEx, composta por organizações militares e civis, públicas e privadas que interagem ao longo do processo de P&D de material militar (BRASIL, 2012).

Figura 2 – Sistema de Ciência, Tecnologia e Inovação do Exército

Fonte: Adaptado de Brasil (2012).

Portanto, tendo em vista as particularidades da cultura organizacional do SCTIEx (pontos detalhados na Seção 4), identificou-se a necessidade de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019), de forma similar às customizações empreendidas pelas organizações focais apresentadas na Seção 2.1.

3 Aspectos metodológicos

O objetivo desta pesquisa foi o de explorar a customização do processo de APT sob a perspectiva de uma organização focal. Esse objetivo foi perseguido sob a ótica de uma rede de desenvolvimento de produtos de alta tecnologia. Segundo Dubois e Gadde (2002), pesquisas relacionadas a esse tipo de rede apresentam uma série de variáveis interdependentes que agregam complexidade à análise. Da mesma forma, Dubois e Gibbert (2010) argumentam que as redes de desenvolvimento de produtos de alto nível tecnológico apresentam aos pesquisadores desafios particulares, uma vez que não constituem sistemas fechados, delimitados ou claramente definidos. Nesse contexto,

as principais unidades de análise são organizações e relacionamentos de difícil acesso e de estrutura complexa em comparação, por exemplo, com os mercados consumidores. Como resultado, um estudo de caso de uma única ou de um pequeno número dessas entidades pode fornecer uma grande quantidade de dados, em grande parte qualitativos, que podem ser escritos como um caso (EASTON, 2010, p. 118).

O estudo de caso pode ser considerado como uma descrição e análise aprofundada e holística de um fenômeno delimitado, como um programa, uma instituição, uma pessoa, um processo ou uma unidade social (MERRIAM, 1998). Nesse tipo de pesquisa, vários métodos de coleta e análise de dados são adotados para desenvolver e entender o caso, moldados pelo contexto e pelos dados emergentes (STAKE, 1995). Como método qualitativo, a pesquisa de estudo de caso é um processo linear, mas também iterativo, envolvendo as atividades de planejar, projetar, coletar e analisar dados que investigam um fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto (YIN, 2017). Também é considerado mais apropriado para estudar questões do tipo “como” e “por que”, pois tratam de ligações operacionais a serem rastreadas ao longo do tempo (YIN, 1994).

Para tanto, foi conduzido um estudo de caso utilizando a rede do SCTIEx (BRASIL, 1994), em que o DCT pode ser considerado como organização focal. Os atores dessa rede pertencem a organizações bastante diversificadas, como universidades; pequenas, médias e grandes empresas; órgãos de fomento; institutos de pesquisa, além dos próprios usuários dos produtos desenvolvidos da rede (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019).

O DCT possui um papel chave na gestão do ciclo de vida de produtos de defesa, especialmente nas fases de formulação conceitual e obtenção¹. Nesse sentido, esse Departamento possui todas as características de uma organização focal que precisa inserir um processo de avaliação de maturidade tecnológica alinhado com seus macroprocessos de gestão de produtos de alta tecnologia. Além disso, a abrangência alcançada pelo SCTIEx relativa à diversidade de atores e variedade de produtos de interesse faz com que esse seja um caso de estudo emblemático, haja vista que a customização em comento requer a convergência de ideias entre atores de variadas formações e entendimentos sobre tecnologia.

3.1 Coleta de dados

Em uma primeira rodada de discussão da calculadora TRL customizada para o EB (quarta etapa do diagrama da Figura 5), foi realizado um *workshop* que contou com a participação de diversos especialistas do DCT. Divididos em 4 (quatro) grupos focais, de acordo com a afinidade das atividades de suas organizações, os especialistas foram encarregados de simular o enquadramento de tecnologias críticas de sua escolha, na calculadora. Os especialistas, suas organizações e suas afinidades quanto às faixas TRL são apresentados no Quadro 2.

¹ P&D e/ou aquisição de sistema ou material com as características técnicas, operacionais e logísticas estabelecidas pelo EB (BRASIL, 2016).

Quadro 2 – Grupos de especialistas consultados em *workshop* realizado no Instituto Militar de Engenharia para estudo da proposta de calculadora TRL

Perfil do especialista	N.º de especialistas	Organização	Grupos e Faixa TRL atribuída
Professores, pesquisadores, chefes de divisão.	7	IME (Instituto Militar de Engenharia)	Grupo 1: afinidade com pesquisa básica e aplicada; verificação de viabilidade técnica.
Chefes e especialistas em projetos de P&D.	5	CTEx (Centro Tecnológico do Exército)	Grupo 2: afinidade com desenvolvimento e demonstração de tecnologias.
Especialistas em testes de produtos de defesa.	2	CAEx (Centro de Avaliações do Exército)	Grupo 3: afinidade com desenvolvimento de produto; integração e testes; produto em operação.
Especialistas na contratação de desenvolvimento de produtos de defesa.	3	DF (Diretoria de Fabricação)	
Especialistas em inovação tecnológica.	3	AGITEC (Agência de Gestão e Inovação Tecnológica do Exército)	Grupo 4: afinidade com o aspecto gerencial e visão macro.
Alunos da Escola de Comando e Estado Maior do Exército.	2	ECEME (Escola de Comando e Estado Maior do Exército)	

Fonte: Os autores (2022).

Na simulação, após análises e discussões, os especialistas de cada grupo responderam às perguntas da calculadora e enquadraram a tecnologia em avaliação em um nível TRL, apresentando, ao final, as justificativas para o enquadramento. Fruto das discussões surgiram dúvidas, comentários, críticas e sugestões sobre o questionário da calculadora que ensejaram a elaboração de um relatório, cuja análise permitiu o refinamento da calculadora TRL.

Numa segunda fase de discussão (sexta etapa do diagrama da Figura 5), procurou-se aplicar a escala e o questionário resultantes da etapa anterior em projetos reais. Foram selecionados três programas em andamento no DCT, o programa de Diretriz Estratégica para a Formulação Conceitual dos Meios Blindados do Exército Brasileiro (EB) (PROJETO..., 2019), o programa Rádio Definido por *Software* (PRADO FILHO; GALDINO; MOURA, 2017)

e o programa Míssil Solo – Solo 1.2 (BRASIL, 2020). Esses três programas foram escolhidos pelo fato de se encontrarem em diferentes estágios de desenvolvimento, como consequência contemplando no estudo tecnologias críticas e subsistemas em diversificados estágios de maturidade, proporcionando assim, uma análise completa.

Foram consultadas algumas empresas nacionais do setor de defesa envolvidas com esses programas, além de organizações pertencentes ao próprio DCT. A relação dos atores e respectivos subsistemas avaliados seguem no Quadro 3.

Quadro 3 – Relação das empresas, tecnologias avaliadas e especialistas entrevistados

Organização fornecedora de tecnologia	Tecnologias e subsistemas avaliados	Quantidade de especialistas entrevistados	Cargo dos especialistas
CTEx – Laboratório de Optrônica	Monóculo de imagem térmica; OLHAR e o Sistema de Visão Assistida Multiespectral.	1	Gerente de projeto.
CTEx – Departamento de Tecnologia da Informação	Rádio Definido por <i>Software</i> Veicular.	5	Especialistas técnicos do projeto RDS.
CTEx – Grupo de Mísseis e Foguetes	Míssil Solo-Solo 1.2.	3	Chefe do grupo, gerente de projeto e especialista técnico.
CDS	Gerenciador do Campo de Batalhas	1	Gerente de projeto.
ARES	Plataformas giroestabilizadas; aplicações de <i>software</i> de simulação gráfica; explosivos e munições; eletrônica de direção de tiro; REMAX; REMAN; Sistemas ópticos; e Sistemas eletro-ópticos.	5	Diretor comercial e de marketing, 2 Gerentes de projeto e 2 especialistas técnicos.
OPTO	Sistema Universal de Visão; Periscópio Ótico e Sistemas Optrônicos.	3	CEO, 1 Gerente Industrial e 1 Diretor Industrial.
Equitron	Atuadores de giro e elevação; Pack de energia; Baterias; Sistema de Câmeras de consciência situacional; Caixa de transferência; Caixa de reversão; Conjunto de Freios; Diferencial e Bloqueio; Painel de comando; Display de tiro e consciência situacional; Joystick de controle de tiro; Barramento de integração com Optrônicos – HMI.	2	Diretor Presidente e 1 especialista técnico.

Fonte: Os autores (2022).

Para o caso das empresas, foram realizadas visitas técnicas e entrevistas com integrantes-chave a fim de enquadrar os subsistemas selecionados utilizando a calculadora TRL, em sua versão aprimorada. Além disso, foi permitida a visita em loco dos produtos e processo produtivo de forma a reforçar as informações prestadas pelas empresas. Durante as entrevistas o foco foi o de identificar os métodos, tipos e ambientes de testes que eram utilizados para os subsistemas, a fim de identificar algum critério não observado na calculadora refinada.

Para o caso das organizações do DCT, além das entrevistas e visitas técnicas, os especialistas preencheram a calculadora TRL, classificando os níveis de maturidade dos subsistemas e assim realizando uma autoavaliação. Em seguida, foram realizados três *workshops* com os especialistas do CTEx, além de uma consulta no âmbito do DCT, onde foi possível o levantamento de novas críticas e sugestões para o refinamento da calculadora.

3.2 Análise dos dados coletados

Os dados coletados podem ser divididos em dois tipos: dados provenientes da revisão bibliográfica e dados empíricos obtidos do estudo com especialistas que labutam em programas e projetos do DCT.

A revisão bibliográfica possibilitou a criação do Quadro 1, construído a partir da análise das customizações realizadas em importantes organizações focais que desenvolvem produtos e sistemas complexos, como o DoD (UNITED STATES, 2009), DoE (UNITED STATES, 2011), ESA (ESA, 2017), DCTA (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) e AEB (XAVIER *et al.*, 2020). Fruto dessa análise, pôde-se concluir sobre os principais fatores que levam a customização do processo de APT: cultura organizacional e método de enquadramento (calculadora).

Os dados empíricos, provenientes das entrevistas e *workshops*, serviram para incluir, ajustar ou remover critérios da calculadora TRL customizada, de acordo com os especialistas que a utilizaram em diversas etapas do processo de customização.

4. Metodologia de enquadramento na escala TRL para o EB

Conforme discutido por França Junior e Galdino (2019), a metodologia de enquadramento de uma tecnologia nos níveis da escala TRL precisa ser customizada de acordo com as particularidades de organizações que trabalham com sistemas de alta tecnologia, a exemplo do SCTIEx (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019).

Desse modo, foi buscada a criação de uma metodologia para o EB que leve em conta as necessidades prementes dessa instituição, como: a avaliação de tecnologias desenvolvidas por organizações externas; a avaliação de tecnologias desenvolvidas por suas organizações em parceria com organizações externas; planejamentos estratégicos de P&D; análises de riscos de desenvolvimento; aproveitamento das informações coletadas ao longo do ciclo de vida de produtos obtidos via P&D pelo Sistema; e aumento do entendimento comum entre atores diversificados do SCTIEx.

Nesse mister, foi desenvolvida uma metodologia de enquadramento na escala TRL (resumida no Quadro 4) baseando-se nos fatores de customização identificados no Quadro 1.

- **Adequação à cultura organizacional:** buscando aderência às Instruções Gerais para Gestão do Ciclo de Vida dos SMEM (IG 01-018) (BRASIL, 2016), a adequação da metodologia de enquadramento na escala TRL se baseou em três aspectos:

I. O primeiro aspecto versa sobre a importância de se inferir sobre a reprodutibilidade de produtos produzidos em grandes quantidades (UNITED STATES, 2020b), por meio da avaliação de um lote piloto². O EB, geralmente, não lida apenas com produtos complexos produzidos em poucas unidades. Ele emprega produtos de variados graus de complexidade e volume de produção, abrangendo desde aqueles produzidos em dezenas e centenas de unidades até os produzidos em massa. Esse aspecto embasou a **inclusão do nível TRL 10** na metodologia;

II. O segundo aspecto relaciona-se com a necessidade da evolução gradual de requisitos operacionais e técnicos (RO e RTLI)³. Devido a longa duração do processo de desenvolvimento de produtos de defesa, é difícil prever com precisão, especialmente em fases iniciais, a arquitetura de produtos complexos, que geralmente envolve uma quantidade elevada de componentes e subsistemas (DAVIES et al., 2011). Dessa forma, é fundamental que a evolução em comento ocorra à medida que o projeto avance nos níveis TRL permitindo que RO e RTLI sejam atualizados em momentos oportunos, até um determinado nível TRL, a partir do qual, mudanças em requisitos acarretam retrabalhos e ampliação de prazos de desenvolvimentos;

III. O terceiro e último aspecto envolve o *feedback* do usuário durante a experimentação doutrinária, após a adoção e distribuição do produto, visando a geração de informações para seu aperfeiçoamento ou desenvolvimento de novas versões (KIRSCHENBAUM et al., 2020; LORD et al., 2019; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2020; STRAUB, 2015). A estrutura organizacional do EB permite que se realize coleta de dados dos produtos e sistemas de defesa em operação (em uso pelo usuário - operacionais), facilitando assim a obtenção de informações importantes para subsidiar decisões de se iniciar novas pesquisas, realizar aperfeiçoamentos de demonstradores de tecnologia e de protótipos de novas versões dos produtos e sistemas, bem como de promover melhorias e correções de falhas e *bugs* dos

2 Produção experimental ou preliminar de um produto, relativamente reduzido, tendo por finalidade adequar o protótipo e testar a respectiva linha de produção (BRASIL, 2016).

3 Nessa metodologia, adota-se que, para o atingimento dos TRL 6 ao 9, são necessários os RO e RTLI homologados. A partir do TRL 6, a atualização de requisitos deve ser realizada com parcimônia e de forma acordada entre as partes técnicas e operacionais, para se evitar retrabalhos. Além disso, propõe-se que, para uma evolução mais incremental e consistente dos requisitos, seja prevista a elaboração de versões preliminares dos RO e RTLI já em TRL 4 e 5, apenas nos requisitos que estiverem relacionados às funções críticas desses níveis.

próprios produtos e sistemas e suas eventuais modernizações. Esse aspecto embasou a **inclusão do nível TRL 11** na metodologia.

- **Desenvolvimento de calculadora:** foi desenvolvida uma calculadora com o intuito de estabelecer etapas específicas que devem ser cumpridas para cada nível TRL, bem como para identificar o tipo de organização responsável pelos critérios de atingimento de determinadas etapas, como os órgãos de Ciência e Tecnologia (C&T), responsáveis pela elaboração da formulação conceitual, pela avaliação de protótipos e lotes piloto e homologação de SMEM; e o Órgão de Direção Geral (ODG), responsável pela elaboração de requisitos operacionais e adoção de SMEM.

Quadro 4 – Resumo da metodologia de enquadramento na escala TRL para o EB

Nível TRL	Descrição
1	Princípios básicos observados e relatados / modelagem teórica: estudos documentados versando sobre princípios científicos básicos, em que potenciais aplicações possam ser identificadas.
2	Conceito de tecnologia e/ou aplicação formulada: estudos documentados que analisam aplicações específicas do objeto (análise de funcionalidades, desempenho e identificação de experimentos).
3	Função crítica experimentada e analisada em ambiente laboratorial: estudos documentados de experimentos demonstrando a viabilidade de aplicação do objeto em ambiente simulado de alta fidelidade (especificação de funcionalidades, desempenho e realização de experimentos).
4	Prova de conceito validada em ambiente laboratorial: funções críticas do objeto, implementadas em uma prova de conceito, são testadas em ambiente laboratorial.
5	Modelo de engenharia validado em ambiente relevante: funções críticas do objeto, implementadas em um modelo de engenharia, são testadas em ambiente relevante.
6	Demonstrador de tecnologia validado em ambiente relevante: funções críticas do objeto, incluídos parâmetros de desempenho, dimensões e peso, implementadas em um demonstrador de tecnologia, são testadas em ambiente relevante, estabelecido de acordo com os Requisitos Operacionais e Técnicos.
7	Demonstrador de tecnologia integrado ao produto alvo validado em ambiente operacional: demonstrador de tecnologia do objeto é integrado ao produto alvo e suas funções críticas são testadas em uma primeira versão do protótipo, em ambiente operacional e de acordo com os Requisitos Operacionais e Técnicos.
8	Protótipo validado em ambiente operacional: o produto alvo é testado considerando quase todos os Requisitos Operacionais e Técnicos. Esse nível representa o final do desenvolvimento do produto.

Nível TRL	Descrição
9	Protótipo avaliado por órgão competente (avaliação de protótipo): o produto alvo é avaliado e homologado pelos órgãos competentes do DCT, de acordo com todos os seus Requisitos Operacionais e Técnicos.
10	Repetibilidade da produção avaliada (avaliação de lote piloto): lote piloto avaliado e homologado pelos órgãos de C&T e adotado pelo ODG.
11	Produto em operação / Feedback de usuário processado: produto melhorado com falhas e <i>bugs</i> corrigidos com base no <i>feedback</i> do usuário.

Fonte: Os autores (2022).

Nota: O glossário de termos da metodologia encontra-se no **Apêndice**.

Importante observar que até o nível 9, a escala TRL para o EB é assemelhada com a escala TRL tradicional. Nesses níveis a customização se restringe aos critérios que devem ser atendidos em cada um dos nove níveis, conforme descrito adiante.

Buscando o estabelecimento de etapas específicas a serem cumpridas em cada nível de prontidão tecnológica, foi desenvolvida uma calculadora, em ambiente *web*⁴, pela Agência de Gestão e Inovação Tecnológica (AGITEC). A ferramenta, que pode ser acessada na rede corporativa do Exército (EBNet) pelo endereço <http://intranet.agitec.eb.mil.br/calculadora>, permite enquadrar uma tecnologia em um nível TRL após a realização de, no máximo, 11 (onze) perguntas.

Apesar do escopo ampliado em relação às demais aplicações encontradas na etapa de revisão bibliográfica (CoPS e produtos produzidos em massa), o que implicou a adição de dois níveis à metodologia, o processo de desenvolvimento foi bem-sucedido no sentido de se obter um procedimento simples. A simplicidade é uma característica fundamental para a pretendida capacidade de facilitar a comunicação entre uma vasta gama de atores no tocante a áreas de atuação e experiências profissionais.

Nos moldes da calculadora apresentada por Nolte, Kennedy e Dziegiel (2003), a aplicação segue o processo em duas etapas: estimação preliminar e confirmação do nível de maturidade. Além disso, de forma semelhante à calculadora IMATEC da Agência Espacial Brasileira (XAVIER et al., 2020), a avaliação do nível TRL de uma tecnologia é realizada em relação a um determinado Produto Alvo⁵.

Na etapa de estimação preliminar do nível de maturidade, conforme ilustrado na Figura 3, identifica-se a faixa TRL em que o Objeto⁶ tem maiores probabilidades de se encontrar:

4 Nome pelo qual a rede mundial de computadores (Internet) se tornou conhecida a partir de 1991, quando se popularizou devido à criação de uma interface gráfica que facilitou o acesso e estendeu seu alcance ao público em geral (OXFORD..., 2021).

5 Produto ou Sistema que se deseja desenvolver, composto de diversas tecnologias críticas e não críticas.

6 Refere-se a uma tecnologia crítica, mas pode ser representado por um sistema, subsistema ou componente (*hardware* ou *software*) que, inserido em uma estrutura hierárquica, integra um sistema ou produto (Produto Alvo).

estudos iniciais (TRL 1 a 3); estágio de desenvolvimento e testes (TRL 4 a 6); estágio de integração, concepção e avaliação do protótipo (TRL 7 a 9); estágio de produção e avaliação do lote piloto (nível 10); e estágio de experimentação e *feedback* do usuário (nível 11).

Figura 3 – Faixas de TRL em que o Objeto pode se encontrar (etapa de estimativa preliminar do nível de maturidade)

CALCULADORA TRL-EB ONLINE V2 Retomar mais tarde Sair e apagar o questionário

*** Em que estágio de desenvolvimento tecnológico se encontra o Objeto?**

Escolha uma das seguintes respostas:

- Pesquisa Básica e Aplicada. Não houve testes laboratoriais das Funções Críticas do Objeto.
- Em fase de testes das Funções Críticas do Objeto por meio de simulação ou validação de uma Prova de Conceito, Modelo de Engenharia ou Demonstrador de Tecnologia. O Objeto NÃO foi integrado ao Produto Alvo.
- O Objeto foi integrado ao Produto Alvo.
- O Produto Alvo foi homologado.
- O Lote Piloto foi homologado.
- O Produto Alvo está em uso.

📘 O Objeto pode estar em diferentes estágios de desenvolvimento tecnológico, os quais direcionam para determinados níveis TRL. Por exemplo, estágio de estudos iniciais (TRL-EB 1 a 3); estágio de desenvolvimento e testes (TRL-EB 4 a 6); estágio de integração e concepção do Protótipo (TRL-EB 7 a 9); estágio de produção (TRL-EB 10); e estágio de experimentação e *feedback* do usuário (TRL-EB 11).

Fonte: Intranet da AGITEC.

Na etapa de confirmação, escolhe-se o nível mais apropriado da faixa identificada a partir da validação de seus indicadores. O Objeto é classificado no nível mais alto no qual todos os indicadores tenham sido atendidos. Os indicadores da calculadora para cada nível TRL estão resumidos no Quadro 5.

Quadro 5 – Resumo dos indicadores para cada nível na calculadora TRL para o EB

Nível TRL	Indicadores
1	<ul style="list-style-type: none"> • Definição dos princípios científicos básicos do Objeto analisado como: formulação de leis, hipóteses, propriedades básicas, princípios teóricos ou modelos; • Existência de potenciais aplicações práticas relacionadas aos princípios básicos observados.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos ou proteção industrial do Objeto que analisem funcionalidades, desempenho e identificação de experimentos, para aplicações específicas; • Definição de aplicações específicas do Objeto analisado.
3	<ul style="list-style-type: none"> • Estudos ou artefatos do Objeto que demonstrem experimentos e que analisem funcionalidades, desempenho e resultados de experimentos, para aplicações específicas; • Demonstração da viabilidade das aplicações (Ex.: bancada de laboratório ou simulação computacional com dados reais); • Identificação de interfaces do Objeto com outros Objetos.

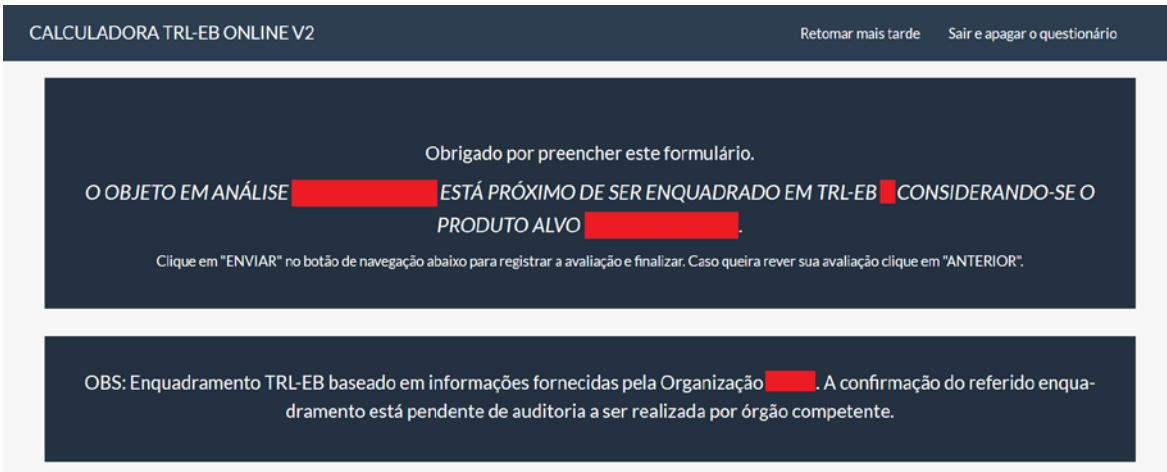
Nível TRL	Indicadores
4	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação das funções críticas do Objeto para serem testadas em uma prova de conceito e em ambiente laboratorial (funções críticas de ambiente laboratorial); • Minuta de RO e RTLI preliminares; • Resultados de testes da prova de conceito em ambiente laboratorial validando com sucesso os requisitos de desempenho e interface.
5	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação das funções críticas do Objeto para serem testadas em um modelo de engenharia e em ambiente relevante (funções críticas de ambiente relevante); • Minuta de RO e RTLI preliminares (com ajustes em relação à versão em TRL 4, se for o caso); • Resultados de testes do modelo de engenharia em ambiente relevante validando com sucesso os requisitos de desempenho e interface.
6	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação das funções críticas do demonstrador, para serem testadas em ambiente relevante, incluídas as relacionadas a dimensões e peso (funções críticas de ambiente relevante do demonstrador de tecnologia); • COMOP, CONDOP, RO e RTLI do Produto Alvo ao qual se destina o Objeto analisado; • Resultados de testes do demonstrador de tecnologia em ambiente relevante validando com sucesso os requisitos de desempenho, dimensões, peso e interface, e em conformidade com os RTLI mapeados nas funções críticas de ambiente relevante.
7	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação das funções críticas do demonstrador, para serem testadas em ambiente operacional, incluídas as que só são possíveis de serem testadas quando esse é integrado ao Produto Alvo (funções críticas de ambiente operacional); • Resultados de testes do demonstrador de tecnologia em ambiente operacional validando com sucesso os requisitos de desempenho e interface e em conformidade com os RTLI mapeados nas funções críticas de ambiente operacional.
8	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolvimento completo do protótipo do Produto Alvo, que integra o Objeto analisado, a ser testado em ambiente operacional; • Resultados de testes do protótipo em ambiente operacional validando com sucesso quase todos os requisitos absolutos dos RO e RTLI.
9	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados de testes do protótipo em ambiente operacional validando com sucesso todos os RO e RTLI; • Relatório de Avaliação homologado por órgão de C&T competente.
10	<ul style="list-style-type: none"> • Lote experimental ou preliminar de um produto, relativamente reduzido, pronto para ser avaliado, com a finalidade de testar a reprodutibilidade de uma linha de produção de baixa escala; • Relatório de Avaliação de lote piloto homologado por órgão de C&T competente; • Ato de adoção do Produto Alvo.
11	<ul style="list-style-type: none"> • Relatório de Experimentação Doutrinária; • Nova versão do Protótipo em utilização, com as informações de uso devidamente implementadas.

Fonte: Os autores (2022).

Nota: O glossário de termos da metodologia encontra-se no **Apêndice**.

Após a validação de indicadores na segunda etapa do preenchimento, conforme ilustrado na Figura 4, a calculadora apresenta o nível TRL em que o Objeto em análise melhor se enquadra, considerando o Produto Alvo associado. Cabe-se destacar que o enquadramento realizado pela calculadora é baseado apenas na indicação de documentos que comprovam o atingimento dos indicadores para um determinado nível TRL. A confirmação do referido enquadramento demanda uma auditoria a ser realizada por órgão competente, caso haja interesse institucional na tecnologia.

Figura 4 – Resultado de enquadramento realizado pela calculadora TRL para o EB



Fonte: Intranet da AGITEC.

É importante ressaltar que a ferramenta possui maturidade considerável em termos de utilização no âmbito do Exército, tendo em vista que o processo de desenvolvimento teve duas rodadas/versões com grande participação das ICT (Instituição Científica, Tecnológica e de Inovação) do EB. A calculadora já contabiliza 520 acessos em sua versão atual (versão 2).

5. Apresentação e discussão dos resultados

A partir dos dados apresentados, verificou-se que a APT baseada na escala TRL é um processo que visa minimizar problemas na definição do estágio de maturação tecnológica, bem como proporcionar uma comunicação eficiente entre especialistas, gestores e outras partes interessadas em organizações que adquirem produtos e sistemas de alta tecnologia.

Como a escala TRL é a ferramenta que embasa todo o processo de APT, constatou-se que a customização do processo de APT sob a perspectiva de uma organização focal se inicia com a customização da metodologia de enquadramento na escala TRL.

No estudo de caso do DCT, organização focal de uma rede de desenvolvimento de tecnologias e produtos de defesa, o processo de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL foi faseado em 9 (nove) etapas:

1. Diagnóstico inicial: conforme apresentado em França Junior e Galdino (2019), é preciso realizar diagnóstico da organização, visando identificar, particularmente, seus pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças; suas características, especificidades e cultura organizacional; e os objetivos pretendidos com a implantação de uma ferramenta de comunicação com capacidade de uniformizar o conhecimento com relação ao nível de maturidade de uma determinada tecnologia. No diagnóstico do DCT, foi identificada a necessidade de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL, tendo em vista que a abordagem metodológica original não atendia plenamente às especificidades da organização. Nesse sentido, dois fatores foram apontados como premissas para o processo de customização:

- **Abrangência:** ampliação do escopo relacionado aos produtos (de CoPS a produtos produzidos em massa) e enfoque na comunicação entre uma vasta gama de atores no tocante a áreas de atuação e experiências profissionais; e
- **Simplicidade:** desenvolvimento de uma ferramenta de fácil acesso e operação e que facilite o processo de auditoria das avaliações realizadas (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019);

2. Revisão bibliográfica: análise de customizações feitas por organizações focais que desenvolvem produtos e sistemas de alta tecnologia. No estudo de caso do DCT, foram analisadas as seguintes organizações focais: DoD (UNITED STATES, 2009), DoE (UNITED STATES, 2011), ESA (ESA, 2017), DCTA (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) e AEB (XAVIER et al., 2020). Conforme sintetizado no Quadro 1, essa análise identificou dois fatores principais para a customização da metodologia de enquadramento na escala TRL: adequação à cultura organizacional e desenvolvimento de calculadora;

3. 1ª Minuta da calculadora: balizando-se por esses dois fatores de customização, foi elaborada, por um conjunto limitado de especialistas, uma primeira minuta de calculadora TRL para o EB;

4. *Workshop* para discussão da calculadora: com o intuito de discutir a primeira minuta da calculadora, foi realizado um *workshop* com vários especialistas de Organizações Militares que atuam desde a pesquisa básica até a utilização do produto, portanto varrendo todas as faixas da escala TRL;

5. Nova calculadora (versão 1): aprimoramento da primeira minuta da calculadora a partir das discussões no *workshop*.

6. Emprego experimental em casos reais: para a experimentação da primeira versão da calculadora, foram selecionados três programas em andamento no DCT, o programa de Diretriz Estratégica para a Formulação Conceitual dos Meios Blindados do Exército Brasileiro (EB) (PROJETO..., 2019), o programa Rádio Definido por *Software* (PRADO FILHO; GALDINO; MOURA, 2017) e o programa Míssil Solo – Solo 1.2 (BRASIL, 2022). Esses três programas foram escolhidos por se encontrarem em diferentes estágios de desenvolvimento, assim suas tecnologias críticas, ou subsistemas, estariam bem distribuídos ao longo da escala TRL, proporcionando uma análise completa;

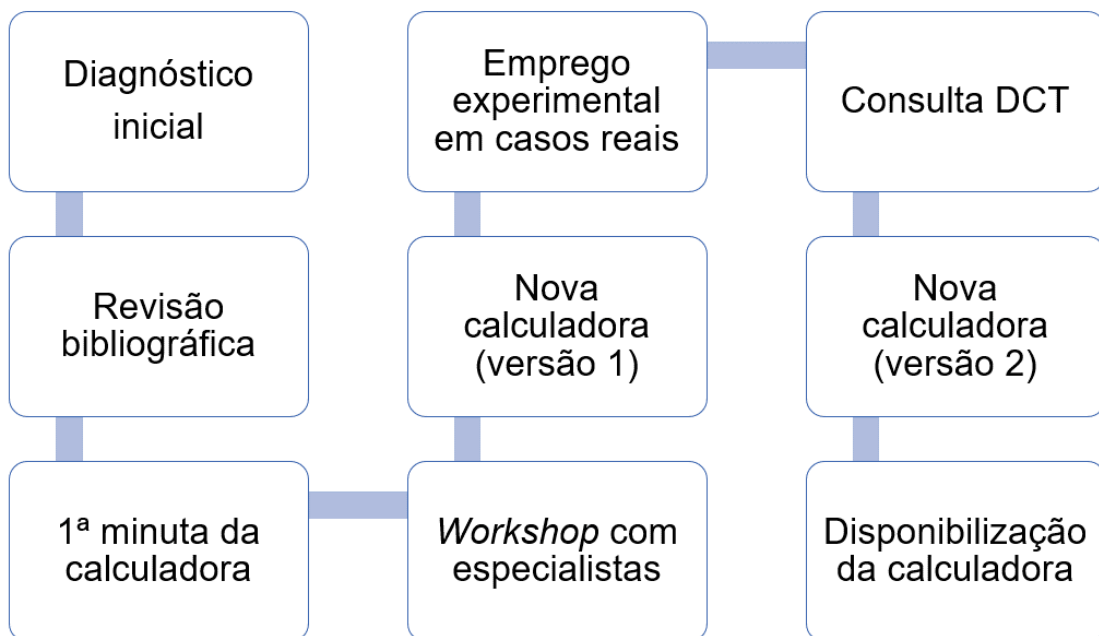
7. Consulta DCT: após o aprimoramento da calculadora com o *workshop* e com o emprego experimental em casos reais, uma consulta foi realizada no âmbito do DCT para validar os avanços realizados;

8. Nova calculadora (versão 2): aprimoramento da calculadora a partir das informações provenientes da rodada de consulta ao DCT;

9. Disponibilização da calculadora: por fim, após o processo de aprimoramento e validação da ferramenta, a calculadora foi disponibilizada para a utilização pelo EB, acessível na rede corporativa do Exército (EBNet) pelo endereço <http://intranet.agitec.eb.mil.br/calculadora>.

As 9 (nove) etapas desse processo de customização seguem representadas no diagrama da Figura 5.

Figura 5 – Etapas do processo de desenvolvimento de uma metodologia de enquadramento na escala TRL para o Exército Brasileiro



Fonte: Os autores (2022).

Após fornecer uma visão geral acerca do processo de customização empreendido no âmbito do EB, faz-se necessária a discussão de alguns pontos importantes identificados ao longo do estudo.

5.1 Aderência à revisão bibliográfica

Em primeiro lugar, deve-se destacar a aderência do caso de estudo à revisão bibliográfica. Foi possível constatar que os dois fatores identificados durante a análise da literatura – cultura organizacional e método de enquadramento (calculadora) – foram necessários e suficientes para o desenvolvimento de uma metodologia de enquadramento na escala TRL customizada para as peculiaridades do Exército Brasileiro.

Nesse contexto, um ponto que merece maior atenção é o detalhamento do esforço necessário para o desenvolvimento da calculadora TRL. Conforme apresentado na Figura 5, esse esforço exigiu nove etapas e o envolvimento de dezenas de atores. Na literatura, o esforço de desenvolvimento de uma calculadora TRL não é detalhado nem mensurado.

5.2 Necessidade de inclusão de níveis adicionais

A adequação da metodologia desenvolvida às Instruções Gerais para Gestão do Ciclo de Vida dos SMEM (IG 01-018) (BRASIL, 2016) se baseou em três aspectos: capacidade de inferência sobre a reprodutibilidade de produtos produzidos em grandes quantidades por meio da avaliação de lote piloto, necessidade da evolução gradual de requisitos operacionais e técnicos (RO e RTLI), e consideração do *feedback* do usuário durante a experimentação doutrinária, visando o aperfeiçoamento ou desenvolvimento de novas versões dos produtos e sistemas.

Com relação à capacidade de inferência sobre a reprodutibilidade de produtos produzidos em grandes quantidades por meio da avaliação de lote piloto, foi possível identificar que a escala TRL original não possuía esse objetivo. O contexto de P&D da NASA é de altíssima complexidade, como telescópios de longo alcance ou foguetes espaciais, o que envolve muitos componentes customizados e poucas unidades produzidas (às vezes uma única unidade). Essas características são típicas de CoPS (HOBDA, 1998), que se diferenciam de produtos produzidos em grandes quantidades (UNITED STATES, 2020b). O EB emprega produtos de variados graus de complexidade e volume de produção, abrangendo desde aqueles produzidos em dezenas e centenas de unidades, até os produzidos em massa. Essa ampla gama de produtos compreende radares, carros de combate, mísseis, rádios táticos, drones, armamento leve, coletes de proteção balística e munição. Esse aspecto embasou a **inclusão do nível TRL 10** na metodologia, que se refere à repetibilidade da produção avaliada (avaliação de lote piloto).

Outro aspecto identificado como não coberto pela escala TRL original foi a consideração do *feedback* do usuário. O Exército Brasileiro prevê o aproveitamento do *feedback* do usuário durante a experimentação doutrinária, após a adoção e distribuição do produto, visando a geração de informações para seu aperfeiçoamento ou desenvolvimento de novas

versões (KIRSCHENBAUM et al., 2020; LORD et al., 2019; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2020; STRAUB, 2015). A estrutura organizacional do EB permite que se realize coleta de dados dos produtos e sistemas de defesa em operação (em uso pelo usuário), facilitando assim a obtenção de informações importantes para subsidiar decisões de se iniciar novas pesquisas, realizar aperfeiçoamentos de demonstradores de tecnologia e de protótipos de novas versões dos produtos e sistemas, bem como de promover melhorias e correções de falhas e bugs dos próprios produtos e sistemas e suas eventuais modernizações. Esse aspecto embasou a **inclusão do nível TRL 11** na metodologia, que se refere ao produto em operação/*feedback* de usuário processado..

5.3 Fatores críticos de sucesso

Ao longo do desenvolvimento de uma metodologia de enquadramento na escala TRL para o EB, foi possível identificar dois fatores críticos que possibilitaram a obtenção de um bom resultado ao esforço empreendido: **abordagem multidisciplinar e governança favorável**.

Quanto à multidisciplinariedade, deve-se destacar que a participação de profissionais de diferentes áreas de atuação (docência, pesquisa, contratos, gestão, testes e avaliação, inovação tecnológica e doutrina militar) e origens (militares, servidores públicos civis e funcionários de empresas da Base Industrial de Defesa - BID) foi de fundamental importância para a incorporação de diferentes pontos de vista na metodologia e estabelecimento de uma base comum de comunicação. Além disso, a discussão e experimentação da calculadora TRL por diferentes atores permitiu a revisão de sua concepção, a remoção de redundâncias e a conciliação de eficácia com simplicidade, tendo em vista que a avaliação TRL pela ferramenta para o EB é acessível (ambiente *web*) e de fácil operação (exige um número máximo de respostas inferior ao exigido pelas calculadoras analisadas na revisão bibliográfica). Ainda com relação à simplicidade, ressalta-se que a aplicação facilita os processos de auditoria, uma vez que incorpora a indicação de documentos comprobatórios de atingimento de indicadores no bojo das avaliações.

No que tange à governança favorável, o apoio da Alta Administração da área de Ciência e Tecnologia do Exército foi crucial para o engajamento de vários profissionais da organização, bem como para a realização das rodadas de consulta que permitiram o aprimoramento da metodologia.

5.4 Generalização do processo de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL

A partir da abordagem *bottom-up* (WALDEN et al., 2015), é possível extrapolar o processo de customização realizado no âmbito do DCT para um processo genérico a ser empreendido por organizações focais que desenvolvem produtos e sistemas de alta tecnologia. Esse processo genérico pode ser representado por 3 (três) etapas:

1. Diagnóstico: realização de diagnóstico da organização, particularmente com relação a seus pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças; suas características, especificidades e cultura organizacional; e objetivos pretendidos com a implantação de uma ferramenta de comunicação que visa uniformizar o conhecimento com relação ao nível de maturidade de uma determinada tecnologia. Esse diagnóstico indica dois caminhos possíveis:

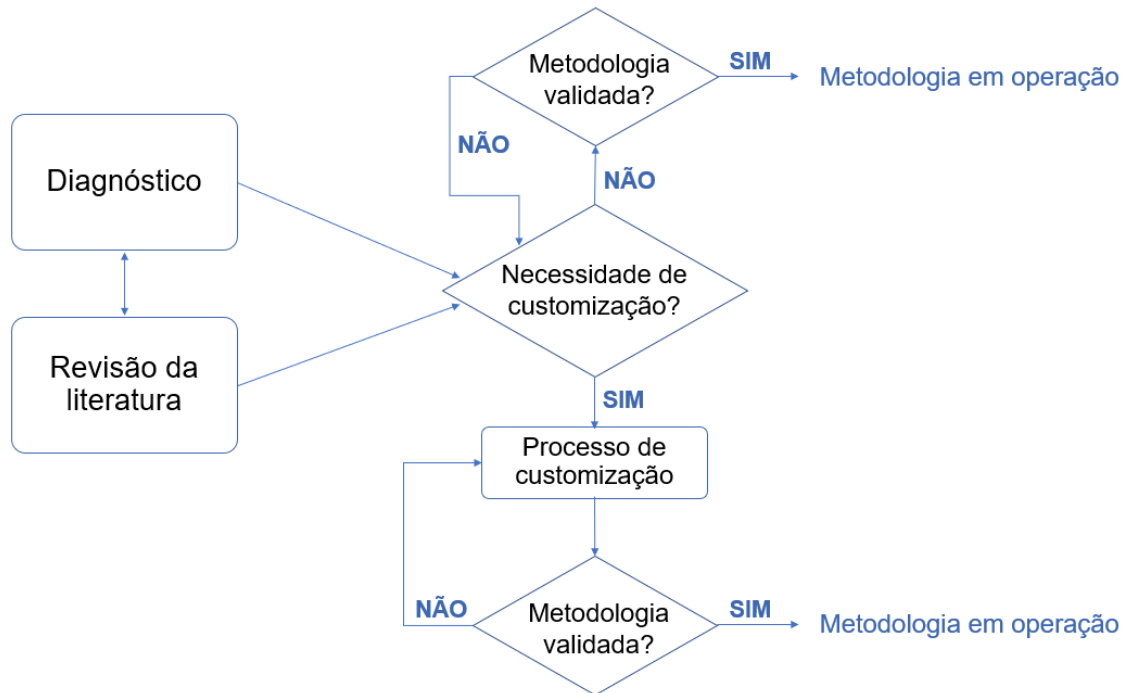
- Se for constatado que a abordagem original não atende plenamente às especificidades da organização, indica-se a necessidade de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL;
- Caso contrário, indica-se a possibilidade de adoção da metodologia original pela organização. Se for necessário, pequenos ajustes podem ser feitos, por exemplo, tradução e/ou adaptação da linguagem;

2. Revisão bibliográfica: de forma a retificar ou ratificar o diagnóstico inicial, deve-se analisar processos de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL empreendidos por organizações focais que desenvolvem produtos e sistemas de alta tecnologia no sentido de compreender o estado da arte associado e construir um referencial comparativo;

3. Processo iterativo de customização: confirmada a necessidade de customização, deve-se dar início ao processo de desenvolvimento de uma metodologia de enquadramento na escala TRL customizada para as especificidades da organização. Considera-se o processo concluído quando as rodadas de validação da metodologia no âmbito da organização são consideradas suficientes. Sugere-se que o desenvolvimento da metodologia seja acompanhado pela implementação de um método de enquadramento (calculadora TRL). Essa ferramenta simplifica a determinação do nível TRL apropriado para uma tecnologia, bem como provê repetibilidade e consistência ao processo (UNITED STATES, 2020a). Além disso, a avaliação não padronizada do estágio de prontidão de uma tecnologia costuma conduzir a discrepâncias entre o nível TRL percebido por diferentes partes envolvidas em um projeto (ALTUNOK; CAKMAK, 2010; FRERKING; BEAUCHAMP, 2016; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2022; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003).

As 3 (três) etapas do processo genérico de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL para organizações focais que desenvolvem produtos e sistemas de alta tecnologia seguem resumidas na Figura 6.

Figura 6 – Processo genérico de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL para organizações focais que desenvolvem produtos e sistemas de alta tecnologia



Fonte: Os autores (2022).

6. Considerações finais

O presente estudo mostrou que a customização da APT baseada na escala TRL é um processo laborioso e complexo, e apresentou os primeiros avanços na adequação da APT à gestão de ciclo de vida de SMEM por parte do EB (desenvolvimento de uma metodologia de enquadramento na escala TRL).

O cenário atual de especificação de processos de APT é mais difundido em países desenvolvidos econômica e tecnologicamente, cujas organizações conseguem inserir a maturação de tecnologias críticas dentro de modelos de gestão de ciclo de vida e *roadmaps* tecnológicos de seus produtos e sistemas complexos (ESA, 2017; UNITED STATES, 2009, 2011).

Buscando essa direção, países com desenvolvimento tardio, como é o caso do Brasil, cujas demandas de alta tecnologia frequentemente não são atendidas internamente, devem customizar os processos de APT e de gestão de ciclo de vida de sistemas no sentido de conciliar estratégias de curto e longo prazo na obtenção e maturação de tecnologias críticas (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2022).

Dentro dessa perspectiva, no escopo dos processos de APT no âmbito do EB, destacam-se os seguintes temas como propostas de trabalhos futuros: aprimoramento do modelo de gestão de ciclo de vida de SMEM/processos de APT com o objetivo de conciliar estratégias

de curto e longo prazo na obtenção e maturação de tecnologias críticas; definição de método para seleção de tecnologias críticas; definição de método para seleção de equipe de APT e seu papel ao longo dos marcos decisórios do ciclo de vida de SMEM; definição de métodos para a maturação de tecnologias críticas; e customização da metodologia de enquadramento na escala TRL para a avaliação de componentes e subsistemas de *hardware*, *software* e/ou da área biomédica.

Em um contexto mais amplo, o artigo propôs, com base no estudo de caso do DCT, um processo genérico de customização da metodologia de enquadramento na escala TRL para organizações focais que desenvolvem produtos e sistemas de alta tecnologia. Nesse esforço de generalização, pode-se abordar, em trabalhos futuros, o emprego da APT baseada na escala TRL como ferramenta de gestão e comunicação em Sistemas Setoriais de Inovação (SSI), como, no âmbito nacional, os SSI de petróleo e gás e do agronegócio (SCHONS; PRADO FILHO; GALDINO, 2022).

Referências

ABNT. **NBR ISO 16290**: sistemas espaciais - definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ALTUNOK, T.; CAKMAK, T. A technology readiness levels (TRLs) calculator *software* for systems engineering and technology management tool. **Advances in Engineering Software**, [s. l.], v. 41, n. 5, May 2010.

BRASIL. Exército. Centro Tecnológico do Exército. Departamento de Ciência e Tecnologia. **Sistema Míssil Superfície-Superfície 1.2 AntiCarro (MSS 1.2 AC)**. Rio de Janeiro: CTEX, jul. 2022. Disponível em: <http://www.ctex.eb.mil.br/projetos-em-andamento/81-missil-superficie-superficie-1-2-ac-mss-1-2-ac>. Acesso em: 29 ago. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Portaria no 032-DCT, de 11 de setembro de 2012**. Aprova a Diretriz de Iniciação do Projeto de Transformação do Sistema de Ciência e Tecnologia do Exército (SCTEx). Brasília, DF: Exército, 2012. Disponível em: http://www.sgex.eb.mil.br/sg8/006_outras_publicacoes/01_diretrizes/09_departamento_de_ciencia_e_tecnologia/port_n_032_dct_11set2012.html. Acesso em: 29 ago. 2022.

BRASIL. Exército. Portaria no 233, de 15 de março de 2016. Aprova as Instruções Gerais para a Gestão do Ciclo de Vida dos Sistemas e Materiais de Emprego Militar (EB10-IG-01.018). Separata de: BRASIL. Exército. **Boletim do Exército**. Brasília, DF: Boletim do Exército, n. 11, mar. 2016. Disponível em: http://www.dct.eb.mil.br/images/conteudo/DSMEM/normas/IG--01-018_2016-Ciclo-de-Vida-do-SMEM.pdf. Acesso em: 29 ago. 2022.

BRASIL. Exército. Portaria no 270, de 13 de junho de 1994. Aprova as Instruções Gerais para o Funcionamento do Sistema de Ciência e Tecnologia do Exército (IG 20-11). **Boletim do Exército**, Brasília, DF, 13 jun. 1994.

CHESBROUGH, H. W. The era of open innovation. **MIT Sloan Management Review**, **Massachusetts**, v. 44, n. 3, 2003.

DAVIES, A. *et al.* **Innovation in complex products and systems**: implications for project-based organizing. Bingley: Emerald Group Publishing Ltd, 2011. v. 28.

DUBOIS, A.; GADDE, L. E. Systematic combining: an abductive approach to case research. **Journal of Business Research**, [s. l.], v. 55, n. 7, 2002.

DUBOIS, A.; GIBBERT, M. From complexity to transparency: managing the interplay between theory, method and empirical phenomena in IMM case studies. **Industrial Marketing Management**, [s. l.], v. 39, n. 1, 2010.

EASTON, G. Critical realism in case study research. **Industrial Marketing Management**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 118-128, Jan. 2010.

ESA. **Space engineering: technology readiness level (TRL) guidelines**. Noordwijk, The Netherlands: European Cooperation for Space Standardization, Mar. 2017. Disponível em: <https://artes.esa.int/sites/default/files/ECSS-E-HB-11A%281March2017%29.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2022.

ESA. **Technology readiness levels in ARTES Technology & product developments**. Paris: European Space Agency, 2020. Disponível em: https://artes.esa.int/sites/default/files/ARTES_TPD_TRL_Definitions.pdf. 2020.

ETZKOWITZ, H.; ZHOU, C. Hélice Tríplice: inovação e empreendedorismo universidade-indústria-governo. **Estudos Avancados**, São Paulo, v. 31, n. 90, maio/ago. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/4gMzWdcjVXCMp5XyNbGYDMQ/?lang=pt>. Acesso em: 25 ago. 2022.

FLEURY, M. T.; FISCHER, R. M. **Cultura e poder nas organizações**. São Paulo: Atlas, 1989.

FRANÇA JUNIOR, J. A.; GALDINO, J. F. Aquisição de sistemas e produtos de defesa: conciliando objetivos de curto e longo prazo. *In*: AZEVEDO, C. E. F.; RAMOS, C. E. de (org.). **Estudos de defesa: inovação, estratégia e desenvolvimento industrial**. Rio de Janeiro: FGV, 2022. v. 1. p. 42-71.

FRANÇA JUNIOR, J. A.; GALDINO, J. F. Gestão de sistemas de material de emprego militar: o papel dos níveis de prontidão tecnológica. **Coleção Meira Mattos: revista de ciências militares**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 47, p. 155-176, 2019. Disponível em: <http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/article/view/1910>. Acesso em: 25 ago. 2022.

FRERKING, M. A.; BEAUCHAMP, P. M. JPL technology readiness assessment guideline. *In*: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2016, Massachusetts. **Proceedings** [...]. Massachusetts: IEEE, 2016.

GAYNOR, G. H. **Innovation by design: what it takes to keep your company on the cutting edge**. New York: America Management Association, 2002.

GRANT, R. M. Toward a knowledge-based theory of the firm. **Strategic Management Journal**, [s. l.], v. 17, n. Winter, 1996. Suppl. 2.

HOBDDAY, M. Product complexity, innovation and industrial organisation. **Research Policy**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 689-710, 1998.

JEAN, F.; LE MASSON, P.; WEIL, B. Sourcing innovation: probing technology readiness levels with a design framework. *In*: INNOVATION THEORY AND THE (RE)FOUNDATIONS OF MANAGEMENT, 2015, Paris. **Proceedings** [...]. Paris: SIG Innovation EURAM, 2015. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01249946/document>. Acesso em: 27 ago. 2022.

KIRSCHENBAUM, L. et al. Building blocks for the future: TRL 10 and 11 Commercial Spacecraft Avionics. *In*: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2020, Massachusetts. **Proceedings** [...]. Massachusetts: IEEE, 2020.

LIMA, F. da C. **O processo decisório para obtenção de materiais de emprego militar no Exército Brasileiro**. 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) - Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/3514/Flavio%20Lima.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2022.

LORD, P. *et al.* Beyond TRL 9: Achieving the Dream of Better, Faster, Cheaper Through Matured TRL 10 Commercial Technologies. *In*: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2019, Massachusetts. **Proceedings** [...]. Massachusetts: IEEE 2019.

MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: a retrospective. **Acta Astronautica**, [s. l.], v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009.

MERRIAM, S. B. **Qualitative research and case study applications in education**. 2nd ed. San Francisco: Jossey-Bass Publishers, 1998.

MÖLLER, K.; HALINEN, A. Managing business and innovation networks—From strategic nets to business fields and ecosystems. **Industrial Marketing Management**, [s. l.], v. 67, n. November, p. 5-22, 2017.

MUDA, F. J.; GOVINDARAJU, R.; WIRATMADJA, I. I. An additional model to control risk in mastering defense technology in Indonesia. **Sustainability**, Switzerland, v. 14, n. 3, 2022.

MUDA, F. J.; GOVINDARAJU, R.; WIRATMADJA, I. I. The Need of TRL 10 for Defense Technology in Indonesia. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRONTIERS OF INDUSTRIAL ENGINEERING*, 7., 2020, Singapore. **Proceedins** [...]. Singapore: IEEE, 2020.

NOLTE, W. L.; KENNEDY, B. M.; DZIEGIEL, R. J. Technology readiness level calculator. *In: WHITE Paper: Air Force Research Laboratory*. [S. l.: s. n.], 2003.

OLECHOWSKI, A. L. *et al.* Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities. **Systems Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 395-408, 2020.

OXFORD languages and Google - English. Oxford: Oxford Languages, 2021.

PRADO FILHO, H. V.; GALDINO, J. F.; MOURA, D. F. C. Pesquisa e desenvolvimento de produtos de defesa: reflexões e fatos sobre o projeto rádio definido por *software* do Ministério da Defesa à luz do modelo de inovação em tríplice hélice. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 6-20, 2017.

PROJETO Nova Couraça, Roadmap da Tropa Blindada do Brasil (AÇO!). **Tecnologia e Defesa**, [Porto Alegre], 19 set. 2019. Disponível em: <https://tecnodefesa.com.br/projeto-nova-couraca-roadmap-da-tropa-blindada-do-brasil-aco/>. Acesso em: 29 ago. 2022.

ROCHA, D.; MELO, F.; RIBEIRO, J. Uma adaptação da metodologia TRL an adaptation of the TRL methodology. **Revista Gestão em Engenharia**, São José dos Campos, v. 4, n. 141, p. 45-56, jan./jun. 2017. Disponível em: <https://fdocumentos.tips/document/revista-gestao-em-engenharia-mecitabr-cgergeartigos-de-padronizar-os.html?page=1>. Acesso em: 25 ago. 2022.

SALAZAR, G.; RUSSI-VIGOYA, M. N. Technology readiness level as the foundation of human readiness level. **Ergonomics in Design**, [London], v. 29, n. 4, 2021.

SAUSER, B. *et al.* Integration maturity metrics: development of an integration readiness level. **Information Knowledge Systems Management**, [s. l.], v. 9, n. 1, 2010.

SCHONS, D. L.; PRADO FILHO, H. V.; GALDINO, J. F. Estudo comparado de sistemas setoriais de inovação: petróleo e gás, agronegócio e do Exército. *In: AZEVEDO, C. E. F.; RAMOS, C. E. de (org.). Estudos de defesa: inovação, estratégia e desenvolvimento industrial*. Rio de Janeiro: FGV, 2022. v. 1. p. 210-239.

STAKE, R. E. **The art of case study research**. Thousand Oaks: Sage Publications, 1995.

STRAUB. In search of technology readiness level (TRL) 10. **Aerospace Science and Technology**, [s. l.], v. 46, July 2015.

UNITED STATES. Accountability Office. General Accounting Office. **Report on Technology Readiness Assessment for the DOD**. Report to Congressional Committees. Washington, DC: General Accounting Office, 2015.

UNITED STATES. Accountability Office. General Accounting Office. **Technology readiness assessment guide**: best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects. Washington, DC: General Accounting Office, Jan. 2020a. (Technical report, GAO-20-48G). Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1105846.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2022.

UNITED STATES. Departmente of Defense. **Manufacturing readiness level (MRL) deskbook**. OSD Manufacturing Technology Program. Virginia: Department of Defense, 2020b. Disponível em: https://www.dodmrl.com/MRL_Deskbook_V2020.pdf. Acesso em: 29 ago. 2022.

UNITED STATES. Departmente of Defense. **Technology Readiness Assessment (TRA) deskbook**. Virginia: Department of Defense, July 2009. Disponível em: https://www.skatelescope.org/public/2011-11-18_WBS-SOW_Development_Reference_Documents/DoD_TRA_July_2009_Read_Version.pdf. Acesso em: 29 ago. 2022.

UNITED STATES. Departmente of Energy. **Technology readiness assessment guide**: springer reference. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2011. Disponível em: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04-admchg1/@@images/file>. Acesso em: 8 set. 2022.

WALDEN, D. *et al.* (ed.). **INCOSE systems engineering handbook**: a guide for system life cycle processes and activities. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2015.

XAVIER, A. *et al.* AEB online calculator for assessing technology maturity: IMATEC. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 12, n. 1, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jatm/a/L6KRCWrww5v5ySWN5h738Nv/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 25 ago. 2022.

YIN, R. K. **Case study research**: design and methods. 2nd ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 1994.

YIN, R. K. **Case study research and applications**: design and methods. 6th ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2017.

Apêndice

Ambiente laboratorial: ambiente controlado que permite testar funções críticas e avaliar o desempenho de uma determinada tecnologia, subsistema ou componente.

Ambiente operacional: ambiente real que permite à avaliação de alguns ou todos os requisitos operacionais especificados para a avaliação de um produto.

Ambiente relevante: ambiente de teste que incorpora aspectos de um ambiente controlado e de um ambiente real, permitindo a simulação de funções críticas e não-críticas de um modelo de engenharia ou demonstrador de tecnologia.

Componente: elemento mais básico pertencente a um subsistema, modelo de engenharia, ou prova de conceito.

Demonstrador de tecnologia: subsistema ou sistema que representa uma tecnologia crítica. Pode ser visto como uma evolução de um modelo de engenharia e é utilizado para demonstrar sua viabilidade técnica em ambiente operacional, de forma a se verificar as especificações técnicas e os requisitos operacionais mais relevantes do produto alvo. Ex.: circuito eletrônico de transmissão e recepção de dados encapsulado, a fim de permitir a portabilidade, obedecendo requisitos operacionais e técnicos prévios de performance, dimensões e peso.

Documentação Científica: documento contendo um texto científico destinado a discutir fenômenos ainda não totalmente compreendidos. Pode ser publicado em revistas, anais, congressos etc.

Funções Críticas: principais funções do objeto avaliado. São as principais funcionalidades, de um subsistema ou componente, a serem testadas para cada nível de prontidão tecnológica. A quantidade de funcionalidades críticas aumenta à medida que os níveis de prontidão vão sendo alcançados. Desse modo, cada nível TRL (do 4 ao 7) possui um conjunto de funções críticas predefinidas que precisam ser testadas com sucesso para que se atinja o referido nível.

Função crítica de ambiente laboratorial: são as funções críticas de uma prova de conceito a serem testadas em ambiente laboratorial, e que devem ser definidas para o atingimento do TRL 4. Ex.: circuito eletrônico de transmissão e recepção de dados, montado em *protoboard* sendo alimentado por fonte de alimentação externa e algoritmo de processamento instalado em computador de mesa. Essa prova de conceito possui a função crítica de transmitir e receber dados criptografados. Pode ser testada em laboratório sem necessidade de avaliar distância e velocidade de transmissão.

Função crítica de ambiente relevante: são as funções críticas que devem ser testadas em ambiente relevante.

Em se tratando de um modelo de engenharia, essas funções críticas devem incluir além daquelas especificadas em TRL 4, outras funções que representem ainda mais do sistema real para o atingimento do TRL 5. Ex.: circuito eletrônico de transmissão e recepção de dados montado em placa de circuito impresso com fonte de alimentação integrada, e antena de potência, e algoritmo de processamento instalado em FPGA. Esse modelo de engenharia possui a função crítica de transmitir e receber dados criptografados a uma distância e velocidade específica. Pode ser testada em campo aberto de forma a avaliar não só a capacidade de transmissão, mas também sua distância e velocidade.

Em se tratando de um demonstrador de tecnologia, essas funções críticas devem incluir além daquelas especificadas em TRL 4 e 5, as relacionadas com performance, peso e dimensões, definindo-se assim um novo conjunto de funções críticas para o atingimento do TRL 6. Ex.: circuito eletrônico de transmissão e recepção de dados encapsulado a fim de permitir a portabilidade, obedecendo requisitos prévios de performance, dimensões e peso. Esse demonstrador de tecnologia possui as funções críticas de transmitir e receber dados criptografados a uma distância e velocidade específica e ser integrável em um dispositivo de comunicação portátil. Deve ser testado em ambiente relevante de forma a avaliar sua performance quanto a distância, velocidade e capacidade de transmissão, além de possuir dimensões e peso viáveis de ser integrado em um dispositivo de comunicação que seja portátil.

Função crítica de ambiente operacional: são as funções críticas de um demonstrador de tecnologia a serem testadas em ambiente operacional quando integrado ao produto alvo, e que devem ser definidas para o atingimento do TRL 7. Além das funções críticas testadas em TRL 6 também devem ser consideradas outras funções críticas do demonstrador de tecnologia que só são possíveis de serem testadas quando esse é integrado ao produto alvo. Ex.: circuito eletrônico de transmissão e recepção de dados integrado a um dispositivo de comunicação portátil. Esse demonstrador de tecnologia quando integrado a um dispositivo de comunicação portátil, deve possuir as mesmas funções críticas de TRL 6, ou seja, transmitir e receber dados criptografados a uma distância e velocidade específica e possuir dimensões compatíveis com a portabilidade do dispositivo de comunicação ao qual ele será integrado. Além disso, sua performance de transmissão deve ser compatível com a capacidade de processamento do dispositivo de comunicação.

Lote Piloto: produção experimental ou preliminar de um produto, relativamente reduzido, tendo por finalidade adequar o protótipo e testar a respectiva linha de produção.

Modelo de engenharia: arranjo de componentes integrados que fornece uma representação de um sistema/subsistema e que pode ser usado para determinar a viabilidade de uma prova de conceito. Pode ser visto como uma evolução de uma prova de conceito, onde os componentes e equipamentos de laboratório são substituídos por modelos próximo do subsistema real para que possam ser testados em ambiente relevante. Ex.: circuito eletrônico de transmissão e recepção de dados montado em placa de circuito impresso com fonte de alimentação integrada, antena de alta potência, e algoritmo de processamento instalado em FPGA.

Objeto: se refere a uma tecnologia crítica, mas pode ser representado por um sistema, subsistema ou componente (*hardware* ou *software*) que, inserido em uma estrutura hierárquica, integra um sistema ou produto (produto alvo).

Pesquisa Aplicada: a pesquisa aplicada com o objetivo de desenvolver tecnologias ou técnicas para intervir e alterar fenômenos naturais ou sociais. Pode ser apoiada em pesquisa básica.

Pesquisa Básica: também chamada pesquisa pura ou pesquisa fundamental, trata-se de pesquisa cujo objetivo é o avanço de teorias científicas visando a predição ou compreensão de fenômenos naturais ou sociais. Possui natureza meramente teórica que intenciona ampliar a compreensão de fenômenos ou comportamentos sem, no entanto, procurar resolver ou tratar eventuais problemas associados a tais fenômenos.

Produto Alvo: produto ou Sistema que se deseja desenvolver, composto de diversas tecnologias críticas e não críticas.

Propriedade Intelectual: compreende as patentes, marcas, desenhos industriais, indicações geográficas etc.

Protótipo: primeira versão do produto alvo a ser produzido e operado. Tem por objetivo validar todos os requisitos técnicos e operacionais especificados.

Prova de conceito: arranjo de componentes integrados que objetiva validar um conceito científico ou as principais funções de uma tecnologia (funções críticas). Normalmente esse arranjo é integrado com equipamentos e componentes de laboratório e componentes de “prateleira”. Ex.: circuito eletrônico de transmissão e recepção de dados, montado em *proto-board* sendo alimentado por fonte de alimentação externa e algoritmo de processamento instalado em computador de mesa.

Requisitos Operacionais (RO): documento que se segue às condicionantes doutrinárias e operacionais no processo de obtenção de um SMEM, que lhe consubstancia as características restritas aos aspectos operacionais.

Requisitos Técnicos, Logísticos e Industriais (RTL): documento que decorre dos requisitos operacionais e consiste na fixação das características técnicas, logísticas e industriais que o sistema ou material deverá ter para cumprir os requisitos operacionais estabelecidos.

Requisitos Operacionais (RO) Preliminares: requisitos que descrevem apenas as principais funcionalidades operacionais da aplicação (ou aplicações) que tem relação com a tecnologia avaliada. Esses requisitos são idealmente elaborados em TRL 4 e 5 e podem ser elaborados pela própria equipe de desenvolvimento caso possuam conhecimento básico das necessidades do usuário, ou essas podem ser extraídas de normas técnicas. Ex.: para o objeto “módulo de recepção e transmissão de dados”, um RO preliminar para as aplicações “rádio definido por *software* veicular” ou “rádio definido por *software* portátil” seria: “o rádio deve transmitir e receber dados de texto, áudio e vídeo, mantendo um enlace de, no mínimo, 20 km e em visada direta”.

Requisitos Técnicos, Logísticos e Industriais (RTLI) Preliminares: requisitos que descrevem apenas as principais funcionalidades técnicas da aplicação (ou aplicações) que tem relação com a tecnologia avaliada e suas funções críticas de ambiente laboratorial. Esses requisitos são idealmente elaborados em TRL 4 e 5 e podem ser elaborados pela própria equipe de desenvolvimento caso possuam conhecimento básico das necessidades do usuário, ou essas podem ser extraídas de normas técnicas. Ex.: para o objeto “módulo de recepção e transmissão de dados”, um RTLI preliminar para as aplicações “rádio definido por *software* veicular” ou “rádio definido por *software* portátil” seria: O rádio deve transmitir e receber dados, garantindo a transferência de 300 (trezentos) kB em no máximo três minutos quando em visada direta numa faixa entre 20 e 40 km.

Sistemas de Produtos Complexos (CoPS): bens de capital, sistemas, redes, unidades de controle, pacotes de *software*, construções e serviços específicos, de alto custo e alta tecnologia (HOBDA, 1998).

Subsistema: arranjo de componentes integrados que realiza uma determinada função dentro de um sistema.

Tecnologia crítica: tecnologia pertencente a um produto alvo que é essencial para o atingimento de seus requisitos operacionais e técnicos obrigatórios. Pode ser uma tecnologia inédita, ou não dominada no país, cuja obtenção (aquisição ou desenvolvimento) é de extrema prioridade, conforme critérios de disponibilidade no mercado nacional e internacional, e de vulnerabilidade logística e de operação.

