

La personalización de los procesos de evaluación de la preparación tecnológica basados en la escala TRL: desarrollo de una metodología para el Ejército Brasileño

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

Resumen: La Evaluación de la Preparación Tecnológica (EPT) basada en la escala TRL es un proceso que tiene como objetivo minimizar los problemas en la definición de la etapa de maduración de las tecnologías, así como proporcionar una comunicación eficiente entre especialistas, gerentes y otras partes interesadas en las organizaciones que adquieren productos y sistemas de alto nivel tecnológico. En este contexto, el trabajo analiza la personalización del proceso EPT desde la perspectiva de una organización focal. Para ello, se utiliza como caso de estudio el DCT (Departamento de Ciencia y Tecnología), organización focal de una red para el desarrollo de tecnologías y productos de defensa en el ámbito del Ejército Brasileño (EB). Los datos recolectados provienen de la revisión bibliográfica (estudio de personalizaciones realizadas por organizaciones de referencia en el escenario nacional e internacional) y de datos empíricos de los programas DCT. Con estos datos, fue posible proponer una metodología para enmarcar la escala TRL personalizada para las especificidades del EB.

Palabras Clave: gestión de la innovación; ingeniería de sistemas; preparación tecnológica; TRL; Ejército brasileño.

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 TRA 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

Recibió: 26 de mayo de 2022

Aprobado: 24 de octubre de 2022

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

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

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



1 Introducción

La Pesquisa y Desarrollo (P&D) de productos de alta tecnología suele caracterizarse por la integración de nuevos componentes y subsistemas de que se encuentran en el estado de arte, lo que conlleva una gran complejidad y un alto grado de incertidumbre durante las primeras etapas del desarrollo tecnológico (DAVIES *et al.*, 2011; MÖLLER; HALINEN, 2017).

Además, en estas primeras etapas, es más difícil evaluar con precisión la fase de evolución de las nuevas tecnologías y el nivel de madurez adecuado para integrarlas, con el fin de diseñar un producto novedoso (OLECHOWSKI *et al.*, 2020). A pesar de estas dificultades, estas evaluaciones son importantes, ya que la integración de componentes y subsistemas aún inmaduros puede causar aumento de costos y retrasos en programas y proyectos de investigación y desarrollo de productos de alta tecnología (UNITED STATES, 2015). Además, tanto la implementación como la evolución de tales programas y proyectos generalmente dependen de decisiones de gerentes que carecen de conocimientos técnicos especializados. En este contexto, las percepciones de maduración tecnológica por actores de formaciones distintas tienden a ser difusos, lo que dificulta llegar a un entendimiento común de la etapa de evolución de las tecnologías involucradas en la concepción del producto deseado (SALAZAR; RUSSI-VIGOYA, 2021).

Para mitigar los problemas de estimación de la etapa de maduración y de comunicación de manera eficiente de estas fases entre especialistas, gerentes y otros interesados en actividades de P&D, la NASA desarrolló, a mediados de la década de 1970, la escala de preparación tecnológica, del término inglés *Technology Readiness Level* (TRL), que estandarizó la maduración de las tecnologías en nueve niveles de preparación (MANKINS, 2009).

Las actividades de P&D de la NASA generalmente se enfocan en productos altamente complejos que involucran muchos componentes personalizados y se producen en unas pocas unidades (a veces en una sola unidad), como telescopios de largo alcance y cohetes espaciales.

Estas características son típicas de los Sistemas de Producto Complejo (CoPS, del término en inglés *Co roduct Systems*) (HOBDA, 1998), que difieren de los productos producidos en masa, o *commodities*. Vale la pena mencionar que la naturaleza de los productos y la cultura organizacional de la NASA se consideraron en el desarrollo de la escala TRL. De esta forma, otras organizaciones centrales con problemas similares a los de la NASA, pero que se ocupan de objetos de P&D de diferentes naturalezas y que tienen diferentes culturas organizacionales, comenzaron a personalizar el proceso de Evaluación de la Preparación Tecnológica (EPT) de acuerdo con sus diferentes contextos. Como ejemplo de organizaciones que han adoptado este enfoque, se puede citar el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD, del término en inglés *Department of Defense*) (UNITED STATES, 2009), el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE, del término en inglés *Department of Energy*) (UNITED STATES, 2011), la Agencia Espacial Europea (ESA, del término en inglés *European Space Agency*) (ESA, 2017) y, en Brasil, el DCTA (Departamento de Ciencia y Tecnología Aeroespacial) (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) y la

AEB (Agencia Espacial Brasileña) (XAVIER *et al.*, 2020) . Estas organizaciones focales se caracterizan por interactuar en una gran red empresarial y de investigación científica, compuesta por pequeñas, medianas y grandes empresas, órganos de fomento, universidades, centros de investigación, etc.

A pesar de la existencia de diferentes procesos personalizados de evaluación de TRL, en lo que respecta a los conocimientos de los autores, no existen estudios que demuestren cómo se puede realizar la personalización de estos procesos. Por lo tanto, con el fin de llenar este vacío en la literatura especializada, este artículo tiene como objetivo explorar el proceso EPT en organizaciones focales de una red empresarial y de investigación científica que desarrollan productos de alta tecnología. Como pregunta de investigación, el estudio se propone responder: **¿Cómo personalizar el proceso EPT desde la perspectiva de una organización focal?**

Para ello, se utilizó como caso de estudio el DCT (Departamento de Ciencia y Tecnología), organismo focal de una red de desarrollo de tecnologías y productos de defensa en el ámbito del Ejército Brasileño (EB), que, al servir como una base para la pregunta de investigación antes mencionada permitió, además, crear una metodología personalizada para las especificidades del EB.

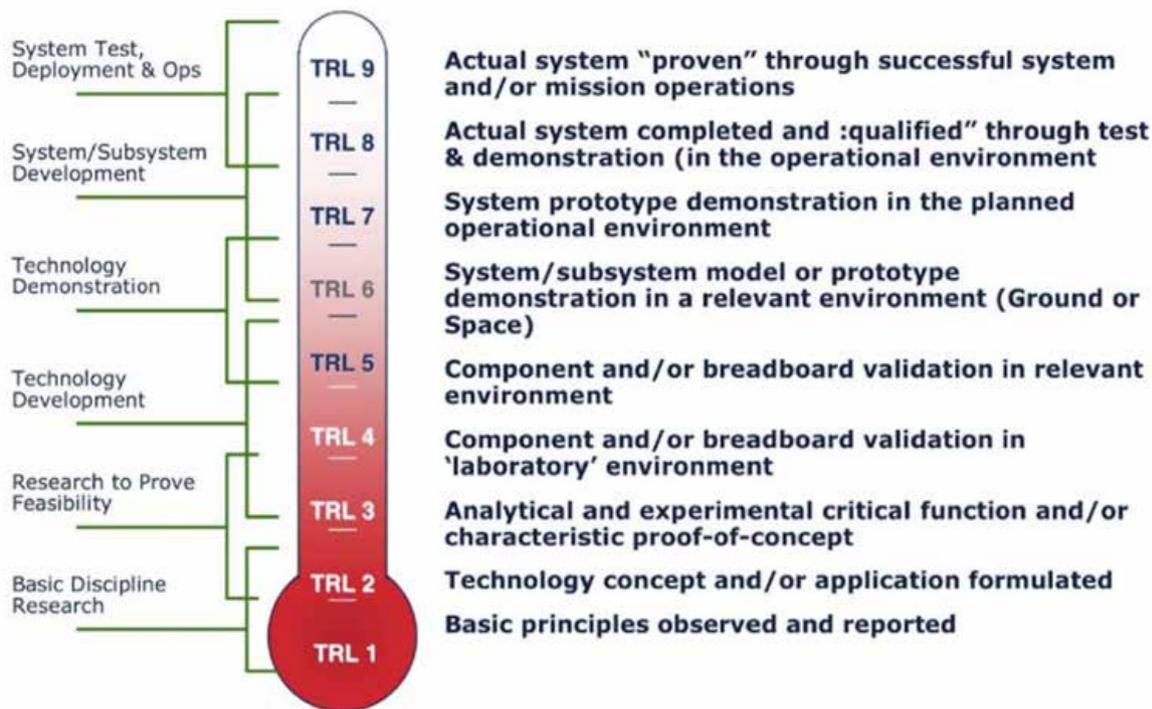
El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta una referencia bibliográfica sobre el proceso EPT basado en la escala TRL y los temas de cultura organizacional e innovación que impactan el proceso. La Sección 3 aborda los aspectos metodológicos generales utilizados en la investigación. En la Sección 4, se detalla la metodología para enmarcar la escala TRL personalizada para el EB. La Sección 5 discute los resultados. Finalmente, las consideraciones finales del estudio se exponen en la Sección 6. Cabe señalar que el Apéndice cuenta con un glosario con la definición de términos utilizados en la metodología descrita en la Sección 4.

2 Referencia bibliográfica

2.1 El proceso de EPT basado en la escala TRL

Para medir la preparación tecnológica en el desarrollo de sistemas espaciales, se creó la herramienta TRL. Desarrollada a mediados de la década de 1970 por la NASA, esta herramienta proporciona una medida relativa del estado de una nueva tecnología en relación con su uso para futuros sistemas espaciales. Fue organizada en 9 (nueve) niveles de preparación, como se muestra en la Figura 1 (MANKINS, 2009) .

Figura 1 – Escala de preparación tecnológica



Fuente: Mankins(2009) .

La adopción de la escala TRL y de un cuidadoso conjunto de procedimientos para inferir sobre el nivel de preparación pueden constituir un mecanismo de interacción impersonal, ya que establece un lenguaje común e identifica hitos críticos del proceso de maduración tecnológica (SAUSER *et al.*, 2010). De esta forma, se mejora la comunicación entre los actores de una red compleja establecida para desarrollar proyectos colaborativos de P&D en colaboración (SAUSER *et al.*, 2010), evitando falsas expectativas sobre la etapa de desarrollo y minimizando riesgos en la integración de sistemas (GRANT, 1996) .

Existen otras escalas, pero la que se ha utilizado con más frecuencia para comunicar sistemáticamente el nivel de madurez de las tecnologías a incorporar en los productos y sistemas es la TRL (UNITED STATES, 2020a) .

Por esta razón, con el tiempo, las organizaciones han desarrollado metodologías de encuadramiento en la escala TRL para satisfacer sus necesidades específicas (JEAN; LE MASSON; WEIL, 2015) y crearon sus propios procedimientos para la EPT. Por ejemplo, el *U.S. Government Accountability Office* (GAO), el órgano del Poder Legislativo encargado de auditar, evaluar e investigar las cuentas públicas del gobierno de los Estados Unidos, establece una guía con los siguientes cinco pasos para llevar a cabo los procesos de EPT:

- 1) Estructurar un plan EPT en el contexto de un programa o proyecto de adquisiciones:** definición de la metodología para enmarcar la escala TRL a utilizar, definición de puntos de EPT a lo largo del ciclo de vida (hitos de toma de decisiones), definición del equipo de EPT y su rol en cada uno de los hitos de toma de decisiones (propósito de las evaluaciones, referencia valores, posibles caminos después de las evaluaciones, etc.);
- 2) Identificar tecnologías críticas:** la criticidad tecnológica tiene sus propias definiciones y criterios, según el contexto de la organización;
- 3) Evaluar tecnologías críticas:** evaluación del nivel de madurez de tecnologías críticas basado en la metodología de encuadramiento en la escala TRL;
- 4) Preparar un informe de EPT:** consolidación de los resultados obtenidos durante la evaluación de tecnologías críticas; y
- 5) Utilizar los resultados del informe de EPT:** análisis y uso de datos de informes en la elaboración de un plan de maduración de tecnología (UNITED STATES, 2020a) .

Esta guía del GAO muestra que la escala TRL es la herramienta que sustenta todo el proceso de EPT. Esta percepción justifica el hallazgo de que la personalización del proceso de EPT desde la perspectiva de una organización focal comienza con la personalización de la metodología de encuadramiento en la escala TRL. Ese fue el camino tomado por el DoD (UNITED STATES, 2009), DoE (UNITED STATES, 2011), ESA (ESA, 2017) y, en Brasil, por el DCTA (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) y AEB (XAVIER *et al.*, 2020).

Buscando adaptar la escala TRL original a las características de sus programas y proyectos de adquisición, el DoD desarrolló una metodología para enmarcar la escala TRL para evaluar la madurez de las tecnologías críticas (CTEs, del término en inglés *Critical Technology Elements*) en sistemas de *hardware* y *software*. Además, el Departamento también cuenta con una metodología para el área biomédica desarrollada por el *United States Army Medical Research and Materiel Command* (USAMRMC). El DoD combina el uso de su metodología con la gestión del ciclo de vida de los sistemas de defensa, ya que define niveles de TRL de referencia para dos hitos de toma de decisiones.

- **Marco de decisión B (Milestone B):** marca el final de la fase de maduración tecnológica y reducción de riesgos. Al final de esta fase, se espera que todas las tecnologías críticas hayan sido demostradas en un ambiente relevante (TRL 6);

- **Marco de decisión C (Milestone C):** marca el final de la fase de desarrollo de ingeniería y fabricación. Al final de esta fase, se espera que todas las tecnologías críticas hayan sido demostradas en un ambiente operativo (TRL 7) (UNITED STATES, 2009).

Para simplificar la determinación del nivel TRL apropiado para una tecnología, el AFRL (*Air Force Research Laboratory*), una organización enmarcada en el organigrama del DoD, desarrolló una calculadora que establece pasos específicos que se deben completar para cada nivel de la escala de preparación tecnológica. Esta herramienta incluye la evaluación de tres tipos de elementos del sistema: componentes de *hardware*, componentes de *software* y componentes con *hardware* y *software* combinados. El uso de la calculadora se lleva a cabo en dos pasos. En el primero, se aplica un conjunto de nueve preguntas para la estimación inicial del nivel TRL de la tecnología. En el segundo, se utiliza un cuestionario detallado para confirmar si el nivel de TRL previamente estimado es adecuado. Si la confirmación no se materializa, se repite el procedimiento con el nivel de TRL inmediatamente inferior. Durante la evaluación, se presentan al evaluador un máximo de 58 (cincuenta y ocho) preguntas (NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003).

A raíz del DoD, el DoE realizó adaptaciones a la metodología de encuadramiento en la escala TRL para dar mayor enfoque al análisis de riesgos en el área de energía. La verificación y validación de Estructuras, Sistemas y Componentes de Seguridad (SSCs, del término en inglés *Safety Structures, Systems and Components*) se incorporaron a la metodología como una forma de mitigar los riesgos tanto para los trabajadores del sector como para el público en general. Para operacionalizar la identificación del nivel TRL de una tecnología, el Departamento utiliza su propia calculadora TRL. Esta herramienta sigue el proceso de dos pasos (estimación preliminar y confirmación del nivel de madurez), en los moldes de la calculadora del DoD. Durante la evaluación, se presentan al evaluador un máximo de 44 (cuarenta y cuatro) preguntas (UNITED STATES, 2011).

En el contexto europeo, la ESA personalizó la metodología del marco de escala TRL para tres segmentos distintos: sistemas espaciales, sistemas terrestres y sistemas basados en *software* (ESA, 2020). Además, la Agencia busca combinar su metodología con las fases del ciclo de vida de sus proyectos y con la elaboración de *roadmaps* tecnológicos. Se adopta el nivel 6 de TRL como requisito mínimo para entrar en la fase de integración tecnológica (ESA, 2017).

En el escenario brasileño, Rocha, Melo y Ribeiro (2017) presentan la personalización realizada en el ámbito del DCTA. Buscando adaptar la escala TRL original al contexto aeroespacial brasileño, se desarrolló la metodología TRL IAE-ITA y su respectiva calculadora. La herramienta consiste en un cuestionario con 89 (ochenta y nueve) preguntas divididas en los siguientes 5 (cinco) requisitos:

- **NBR ISO 16290:2015:** *checklist* de la norma brasileña para la definición de los niveles de madurez tecnológica para los sistemas espaciales (ABNT, 2015);
- **Tecnológico:** relevante para la confirmación de la descripción de la NBR ISO 16290:2015;
- **Económico:** abordar el análisis de riesgos y el desarrollo de proyectos (calendario, presupuesto, etc.);
- **Político-jurídico:** relacionados con la viabilidad del desarrollo, la posibilidad de embargos de desarrollo y cuestiones legales; y
- **Documentales:** relacionados con la gestión del conocimiento, que deben ser documentados, para su posible reproducción (ROCHA; MELO; RIBIERO, 2017).

Siguiendo un enfoque similar, la AEB desarrolló una calculadora TRL llamada IMATEC, para apoyar las decisiones en la gestión del Programa Espacial Brasileño, más específicamente el Programa Nacional de Actividades Espaciales. La Agencia personaliza la herramienta TRL para su uso junto con la Estructura Analítica del Producto (PBS, del término en inglés *Product Breakdown Structure*). La creación de un PBS y la evaluación del nivel de madurez de todos los componentes de un producto tecnológico permiten una estimación exhaustiva del riesgo en una determinada etapa de desarrollo, dado que el grado de preparación de un elemento de la PBS será el índice TRL más bajo de cualquiera de sus elementos constituyentes. Desde esta perspectiva, los componentes de PBS con el índice TRL más bajo se denominan “golletes de riesgo” del producto, ya que propagan sus bajos niveles de madurez tecnológica a los elementos de encuadre en el árbol jerárquico de PBS. Al evaluar el nivel de TRL de un componente de la PBS, la calculadora presenta preguntas de forma incremental. Cuando se responde positivamente a todas las preguntas de un nivel, siguen las preguntas del próximo nivel. Este procedimiento se lleva a cabo hasta que se estima el nivel de TRL. Durante la evaluación de cada componente de la PBS, se presentan al evaluador un máximo de 14 (catorce) preguntas (XAVIER *et al.*, 2020).

En resumen, varias organizaciones crean sus métodos EPT de acuerdo con sus necesidades específicas, pero sin modificar la esencia de la escala TRL original. Del análisis realizado se desprende que estos procesos de personalización de la metodología para la elaboración de la escala de preparación tecnológica tuvieron en cuenta dos factores fundamentales: la adecuación a la cultura organizacional y el desarrollo de una calculadora.

- **Adaptación a la cultura organizacional:** la personalización depende de la cultura organizacional de la red empresarial a la que pertenece la organización focal y sus macroprocesos de gestión tecnológica. Por ejemplo, mientras que el DoD ajusta la EPT dentro del ciclo de vida de sus sistemas (UNITED STATES, 2009), el DCTA se preocupa por cuestiones relacionadas con temas tecnológicos, económicos, documentales y político-jurídicos (ROCHA; MELO; RIBIERO, 2017) . Además, a pesar de la adopción de algunas áreas del conocimiento, como la ingeniería de sistemas, cada organización cuenta con diferentes procedimientos relacionados con la planificación, gestión de requisitos, P&D, pruebas, evaluación y certificación, factores que impactan directamente en el proceso de EPT.
- **Desarrollo de la calculadora:** durante el análisis de los procesos de personalización por parte de las organizaciones focales estudiadas, se verificó que el desarrollo de la metodología suele ir acompañado del desarrollo de una calculadora. A diferencia de las evaluaciones no estándar, una calculadora que consta de un conjunto estándar de preguntas simplifica la determinación del nivel de TRL apropiado para una tecnología, además de brindar repetibilidad y consistencia al proceso (UNITED STATES, 2020a). La evaluación no estándar de la etapa de preparación de una tecnología a menudo conduce a discrepancias entre el nivel TRL percibido por las diferentes partes involucradas en un proyecto (ALTUNOK; CAKMAK, 2010; FRERKING; BEAUCHAMP, 2016; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2022; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003) .

La Tabla 1 resume las principales personalizaciones realizadas por las organizaciones focales analizadas, de acuerdo con los dos factores enumerados.

Tabla 1 – Principales adaptaciones de la metodología de encuadramiento en la escala TRL realizadas por organizaciones focales que adquieren productos y sistemas de alta tecnología

	Adaptación a la cultura organizacional	Desarrollo de la calculadora
DoD	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptación a la gestión de programas y proyectos para la obtención de sistemas de defensa; • Metodología para evaluar la madurez de tecnologías críticas en sistemas de seguridad <i>hardware</i>, <i>software</i> y en el área biomédica; • Combina el uso de la escala de preparación tecnológica con la gestión del ciclo de vida de los sistemas de defensa, definiendo niveles de TRL de referencia para dos hitos de toma de decisiones (TRL 6 para el <i>Milestone B</i> y TRL 7 para el <i>Milestone C</i>). 	Calculadora TRL de la AFRL con proceso de 2 pasos (estimación preliminar y confirmación del nivel de madurez). Herramienta con un número máximo de 58 preguntas.
DoE	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuación a la gestión de proyectos en el área de energía; • Centrarse en el análisis de riesgos; • Incorpora verificación y validación de Estructuras, Sistemas y Componentes de Seguridad. 	Calculadora propia de TRL con proceso de 2 pasos (estimación preliminar y confirmación del nivel de madurez). Herramienta con un número máximo de 44 preguntas.
ESA	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptación a los sistemas aeroespaciales en el contexto europeo; • Metodología para tres segmentos bien diferenciados: sistemas espaciales, sistemas terrestres y sistemas basados en <i>software</i>; • Combina el uso de la escala de preparación tecnológica con las fases del ciclo de vida de los proyectos y con la elaboración de <i>roadmaps</i> tecnológicos; • Se adopta el nivel TRL 6 como requisito mínimo para entrar en la fase de integración tecnológica. 	No se informa el desarrollo/empleo de la calculadora.
DCTA	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptación a la norma brasileña NBR ISO 16290:2015; • Inserta preguntas relacionadas con temas tecnológicos, económicos, documentales y político-jurídicos. 	Calculadora TRL IAE-ITA, herramienta con 89 preguntas divididas en 5 ítems (NBR ISO 16290:2015, tecnológicos, económicos, documentales y político-jurídicos).
AEB	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptación a los sistemas espaciales en el contexto del Programa Espacial Brasileño; • Combina la metodología de encuadramiento en la escala TRL con la PBS; • Foco en análisis de riesgo de proyectos relacionados con el desarrollo de productos de alta tecnología. 	Calculadora TRL IMATEC, herramienta con un número máximo de 14 preguntas para la evaluación de cada uno de los componentes de la PBS.

Fuente: los autores (2022)

2.2 Aspectos de la cultura organizacional y de innovación que impactan en el proceso

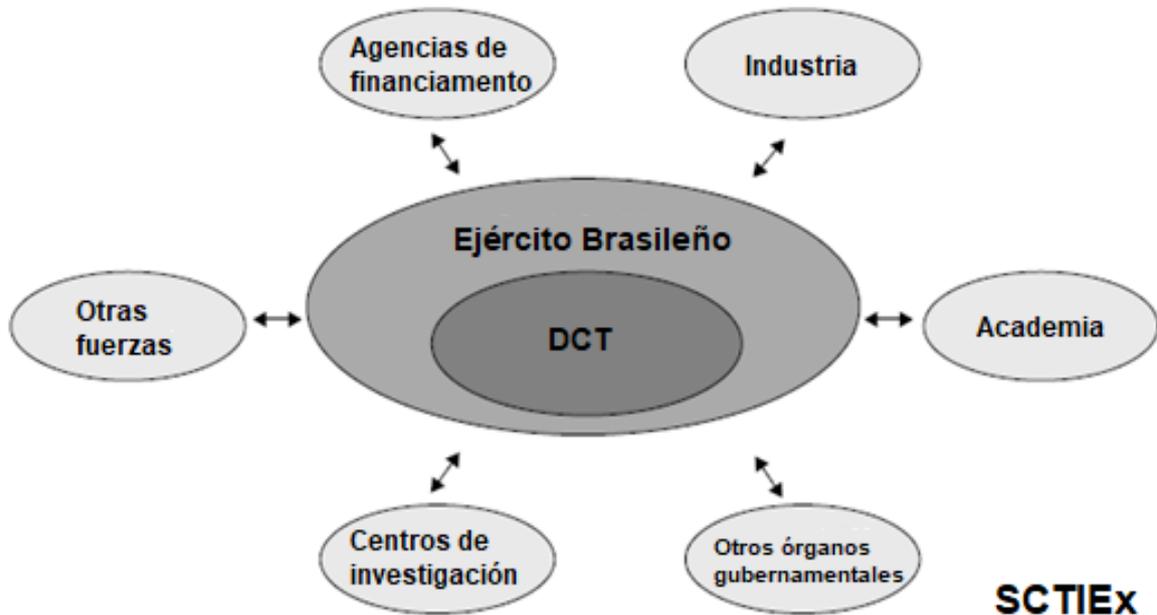
El concepto de cultura organizacional se refiere a valores compartidos, creencias, nomenclatura, rituales, historia, tradiciones intelectuales y operativas, orgullo por los logros, políticas y prácticas, reglas de conducta, filosofía y otros aspectos que definen a una organización. (GAYNOR, 2002). La cultura organizacional se concibe como un conjunto de valores y supuestos básicos expresados en elementos simbólicos que, en su capacidad de ordenar, atribuir significados y construir identidad organizacional, actúan como elemento de comunicación y consenso. (FLEURY; FISCHER, 1989).

Esta búsqueda de comunicación precisa y consenso en el ambiente organizacional ha sido abordada en la literatura de teoría organizacional en diferentes contextos, enfocándose, directa o indirectamente, en mecanismos que contribuyen a incrementar el entendimiento común (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019). Promover la comunicación, integrar el conocimiento tácito y comprender diferentes perspectivas en redes complejas compuestas por actores con formaciones y experiencias diversas son problemas que enfrentan las organizaciones encargadas de gestionar y llevar a cabo actividades de P&D de productos y sistemas de alta tecnología (DAVIES *et al.*, 2011).

Según Schons, Prado Filho y Galdino(2022), estudios realizados en el ámbito del EB han sugerido que es imperativo desarrollar la capacidad para realizar actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (CT&I) en complejas redes colaborativas de alcance nacional para fortalecer los vínculos entre academia, industria y gobierno (triple hélice) (ETZKOWITZ; ZHOU, 2017) y emprender un modelo de innovación abierta (CHESBROUGH, 2003) reemplazando el modelo tradicional de innovación cerrada.

En este contexto, el Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación del Ejército (SCTIEx), elemento clave del sector de defensa brasileño, se presenta como un vector fundamental en el proceso de transformación del EB (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019).

Para las fases de diseño, planificación e P&D del ciclo de vida del material militar, el EB cuenta con procedimientos, actividades, metodologías, nomenclaturas, normas e instructivos propios de su cultura organizacional que terminan siendo compartidos por todo el SCTIEx (LIMA, 2007). La figura 2 ilustra la estructura del SCTIEx, compuesta por organizaciones militares y civiles, públicas y privadas, que interactúan a lo largo del proceso de P&D de material militar (BRASIL, 2012).

Figura 2 – Sistema de Ciencia, Tecnología e Innovación del Ejército

Fuente: Adaptado de Brasil (2012).

Por lo tanto, ante las particularidades de la cultura organizacional de SCTIEx (puntos detallados en la Sección 4), se identificó la necesidad de personalizar la metodología para enmarcar la escala TRL (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019), similar a las personalizaciones realizadas por organizaciones de enfoque presentadas en la Sección 2.1.

3 Aspectos metodológicos

El objetivo de esta investigación fue explorar la personalización del proceso de EPT desde la perspectiva de una organización focal. Este objetivo se persiguió desde la perspectiva de una red de desarrollo de productos de alta tecnología. Según Dubois y Gadde (2002), las investigaciones relacionadas con este tipo de redes presentan una serie de variables interdependientes que añaden complejidad al análisis. Asimismo, Dubois y Gibbert (2010) argumentan que las redes de desarrollo de productos de alta tecnología presentan desafíos particulares a los investigadores, ya que no constituyen sistemas cerrados, delimitados o claramente definidos. En ese contexto,

las principales unidades de análisis son organizaciones y relaciones de difícil acceso y con una estructura compleja en comparación, por ejemplo, con los mercados de consumo. Como resultado, un estudio de caso de una sola o un pequeño número de estas entidades puede proporcionar una gran cantidad de datos, en gran parte cualitativos, que pueden escribirse como un caso. (EASTON, 2010, p. 118).

El estudio de caso puede ser considerado como una descripción y análisis profundo y holístico de un fenómeno delimitado, como un programa, una institución, una persona, un proceso o una unidad social (MERRIAM, 1998). En este tipo de investigación, se adoptan varios métodos de recopilación y análisis de datos para desarrollar y comprender el caso, moldeados por el contexto y los datos emergentes (STAKE, 1995). Como método cualitativo, la investigación de estudio de caso es un proceso lineal, pero también iterativo, que involucra las actividades de planificación, diseño, recopilación y análisis de datos que investigan un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto (YIN, 2017). También se considera más apropiado para estudiar preguntas de "cómo" y "por qué", ya que se tratan de vínculos operativos que deben rastrearse a lo largo del tiempo (YIN, 1994).

Por ello, se realizó un estudio de caso utilizando la red del SCTIEx (BRASIL, 1994), en el que el DCT puede ser considerado como una organización focal. Los actores de esta red pertenecen a organizaciones muy diversas, como universidades; pequeñas, medianas y grandes empresas; órganos de fomento; institutos de investigación, además de los usuarios de los productos desarrollados a partir de la red (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019).

El DCT juega un papel clave en la gestión del ciclo de vida de los productos de defensa, especialmente en las fases de formulación conceptual y adquisición¹. En este sentido, este Departamento tiene todas las características de una organización focal que necesita insertar un proceso de evaluación de la madurez tecnológica en línea con sus macroprocesos de gestión de productos de alta tecnología. Además, la amplitud alcanzada por SCTIEx en cuanto a la diversidad de actores y variedad de productos de interés lo convierte en un caso de estudio emblemático, dado que la personalización en cuestión requiere de la convergencia de ideas entre actores de diferentes formaciones y entendimientos sobre tecnología.

3.1 Recopilación de datos

En una primera ronda de discusión de la calculadora TRL personalizada para el EB (cuarto paso del diagrama en la Figura 5), se realizó un *workshop* que contó con la participación de varios especialistas del DCT. Divididos en 4 (cuatro) grupos focales, de acuerdo con la afinidad de las actividades de sus organizaciones, los especialistas estuvieron a cargo de simular el encuadre de tecnologías críticas de su elección, en la calculadora. Los especialistas, sus organizaciones y sus afinidades con respecto a los rangos de TRL se presentan en la Tabla 2.

1 P&D y/o adquisición de un sistema o material con las características técnicas, operativas y logísticas establecidas por el EB (BRASIL, 2016).

Tabla 2 – Grupos de expertos consultados en *workshop* realizado en el Instituto Militar de Ingeniería para estudio de la propuesta de la calculadora TRL

Perfil de experto	Nº de expertos	Organización	Grupos y Rango TRL atribuidos
Profesores, investigadores, jefes de división.	7	IME (Instituto Militar de Ingeniería)	Grupo 1: afinidad con la investigación básica y aplicada; comprobación de la viabilidad técnica.
Jefes y especialistas en proyectos de P&D.	5	CTEx (Centro Tecnológico del Ejército)	Grupo 2: afinidad con el desarrollo y demostración de tecnología.
Especialistas en pruebas de productos de defensa.	2	CAEx (Centro de Evaluación del Ejército)	Grupo 3: afinidad con el desarrollo de productos; integración y pruebas; producto en funcionamiento.
Especialistas en contratar el desarrollo de productos de defensa.	3	DF (Junta de Fabricación)	
Especialistas en innovación tecnológica.	3	AGITEC (Agencia de Gestión e Innovación Tecnológica del Ejército)	Grupo 4: afinidad con el aspecto gerencial y visión macro.
Alumnos de la Escuela de Comando y Estado Mayor del Ejército.	2	ECEME (Escuela de Comando y Estado Mayor del Ejército)	

Fuente: Los autores (2022)

En la simulación, tras análisis y discusiones, los expertos de cada grupo respondieron las preguntas de la calculadora y enmarcaron la tecnología en evaluación a un nivel TRL, presentando, al final, las justificaciones para la clasificación. Como resultado de las discusiones, surgieron dudas, comentarios, críticas y sugerencias sobre el cuestionario de la calculadora, lo que llevó a la elaboración de un informe, cuyo análisis permitió perfeccionar la calculadora TRL.

En una segunda etapa de discusión (sexta etapa del diagrama de la Figura 5), se intentó aplicar la escala y el cuestionario resultantes de la etapa anterior en proyectos reales. Tres programas en curso fueron seleccionados en el DCT, el programa de Directrices Estratégicas para la Formulación Conceptual de Medios Blindados del Ejército Brasileño (EB) (PROJETO..., 2019), el programa Radio Definido por *Software* (PRADO FILHO; GALDINO; MOURA, 2017) y el

programa Misil Tierra – Tierra 1.2 (BRASIL, 2020). Estos tres programas fueron elegidos porque se encuentran en diferentes etapas de desarrollo, por lo que se incluyen en el estudio tecnologías críticas y subsistemas en diferentes etapas de madurez, brindando así un análisis completo.

Se consultó a algunas empresas del sector de defensa nacional involucradas en estos programas, así como a organizaciones pertenecientes al propio DCT. La lista de actores y sus subsistemas evaluados se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 – Lista de empresas, tecnologías evaluadas y expertos entrevistados

Organización proveedora de tecnología	Tecnologías y subsistemas evaluados	Número de expertos entrevistados	Puesto de especialistas
CTEx - Laboratorio de Optrónica	Monóculo de imágenes térmicas; OLHAR y el Sistema de Visión Asistida Multiespectral.	1	Gerente de proyecto
CTEx - Departamento de Tecnología de la Información	Radio definida por <i>Software</i> de vehículos	5	Técnicos expertos del proyecto RDS.
CTEx - Grupo de Misiles y cohetes	Misil Tierra-Tierra 1.2.	3	Líder de grupo, jefe de proyecto y experto técnico.
CDS	Gerente de Campo de Batallas	1	Gerente de proyecto
ARES	Plataformas giroestabilizadas; aplicaciones de <i>software</i> simulación gráfica; explosivos y municiones; electrónica de dirección de tiro; REMAX; REMAN; Sistemas ópticos; y Sistemas electro-ópticos.	5	Director comercial y de marketing, 2 Gerente de proyecto y 2 técnicos especialistas.
OPTO	Sistema de Visión Universal; Periscopio Óptico y Sistemas Optrónicos.	3	CEO, 1 Gerente Industrial y 1 Director Industrial.
Equitrón	Actuadores de giro y elevación; <i>Pack</i> de energía; Baterías; Sistema de Cámaras de conciencia situacional; Caja de transferencia; Caja de inversión; Juego de Frenos; Diferencial y Bloqueo; Panel de control; Exhibición de tiro y conciencia situacional; <i>Joystick</i> de control de tiro; Bus de integración con Optronics – HMI.	2	Director General y 1 especialista técnico.

Fuente: Los autores (2022).

En el caso de las empresas, se realizaron visitas técnicas y entrevistas a miembros claves para enmarcar los subsistemas seleccionados utilizando la calculadora TRL, en su versión mejorada. Además, se permitió una visita in situ de los productos y proceso productivo con el fin de reforzar la información brindada por las empresas. Durante las entrevistas, el enfoque fue identificar los métodos, tipos y ambientes de prueba que se utilizaron para los subsistemas, con el fin de identificar cualquier criterio no observado en la calculadora refinada.

En el caso de las organizaciones del DCT, además de las entrevistas y visitas técnicas, los especialistas llenaron la calculadora TRL, clasificando los niveles de madurez de los subsistemas y realizando así una autoevaluación. Entonces, tres *workshops* con los especialistas del CTEx, además de una consulta en el ámbito del DCT, donde fue posible plantear nuevas críticas y sugerencias para el perfeccionamiento de la calculadora.

3.2 Análisis de los datos recopilados

Los datos recopilados se pueden dividir en dos tipos: datos de la revisión bibliográfica y datos empíricos obtenidos del estudio con especialistas que trabajan en programas y proyectos del DCT.

La revisión bibliográfica permitió la creación de la Tabla 1, construida a partir del análisis de las personalizaciones realizadas en importantes organizaciones focales que desarrollan productos y sistemas complejos, como el DoD (UNITED STATES, 2009), DoE (UNITED STATES, 2011), ESA (ESA, 2017), DCTA (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) y AEB (XAVIER *et al.*, 2020). Como resultado de este análisis, se pudo concluir sobre los principales factores que conducen a la personalización del proceso de EPT: cultura organizacional y método de encuadramiento (calculadora).

Los datos empíricos de las entrevistas y *workshops* se utilizaron para agregar, ajustar o eliminar criterios de la calculadora TRL personalizada, según los expertos que la usaron en diferentes etapas del proceso de personalización.

4 Metodología de encuadramiento en la escala TRL para el EB

Tal como lo discutieron França Junior y Galdino (2019), la metodología para enmarcar una tecnología en los niveles de escala TRL debe personalizarse de acuerdo con las particularidades de las organizaciones que trabajan con sistemas de alta tecnología, como SCTIEx (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019).

Así, se buscó la creación de una metodología para el EB que tuviera en cuenta las necesidades urgentes de esta institución, tales como: la evaluación de tecnologías desarrolladas por organismos externos; la evaluación de tecnologías desarrolladas por sus organizaciones en asociación con organizaciones externas; planificación estratégica de P&D; análisis de riesgos de desarrollo; uso de la información recopilada a lo largo del ciclo de vida de los productos obtenidos a través de P&D por el Sistema; y aumento el entendimiento común entre los diversos actores del SCTIEx.

En esta tarea, se desarrolló una metodología para enmarcar la escala TRL (resumida en la Tabla 4) basada en los factores de personalización identificados en la Tabla 1.

- **Adaptación a la cultura organizacional:** buscando la adhesión al Instructivo General para la Gestión del Ciclo de Vida de los SMEM (IG 01-018) (BRASIL, 2016), la adecuación de la metodología de encuadramiento en la escala TRL se basó en tres aspectos:

I. El primer aspecto trata sobre la importancia de inferir sobre la reproducibilidad de productos hechos en grandes cantidades (UNITED STATES, 2020b), a través de la evaluación de un lote piloto ². El EB generalmente no solo se ocupa de productos complejos producidos en unas pocas unidades. Emplea productos de diversos grados de complejidad y volumen de producción, que van desde los producidos en decenas y cientos de unidades hasta los producidos en masa. Este aspecto sustentó la **inclusión del nivel TRL 10** en la metodología;

II. El segundo aspecto se relaciona con la necesidad de una evolución gradual de los requisitos operativos y técnicos (RO y RTLI) ³. Debido a la larga duración del proceso de desarrollo de productos de defensa, es difícil predecir con precisión, especialmente en las primeras etapas, la arquitectura de productos complejos, que normalmente involucran una gran cantidad de componentes y subsistemas (DAVIES *et al.*, 2011). Por lo tanto, es fundamental que la evolución en cuestión se produzca a medida que el proyecto avanza a través de los niveles de TRL, lo que permite actualizar RO y RTLI en los momentos oportunos, hasta un cierto nivel de TRL, a partir del cual los cambios en los requisitos conducen a reelaboraciones y ampliación de plazos de desarrollo; y

III. El tercer y último aspecto implica el *feedback* del usuario durante la experimentación doctrinal, posterior a la adopción y distribución del producto, visando la generación de información para su perfeccionamiento o desarrollo de nuevas versiones (KIRSCHENBAUM *et al.*, 2020; LORD *et al.*, 2019; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2020; STRAUB, 2015). La estructura organizacional del EB permite la recolección de datos de los productos y sistemas de defensa en operación (en uso por el usuario - operativos), facilitando así la obtención de información importante para subsidiar decisiones para iniciar nuevas investigaciones, realizar mejoras en demostradores de tecnología y prototipos de nuevas versiones de productos y siste-

2 Producción experimental o preliminar de un producto relativamente pequeño, con el propósito de adaptar el prototipo y probar la respectiva línea de producción (BRASIL, 2016).

3 En esta metodología, se asume que, para lograr TRL 6 a 9, se requieren RO y RTLI aprobados. A partir del TRL 6, la actualización de requisitos debe realizarse con moderación y de manera consensuada entre las partes técnicas y operativas, para evitar reelaboraciones. Además, se propone que, para una evolución más incremental y consistente de los requisitos, se prevea la elaboración de versiones preliminares del RO y RTLI ya en TRL 4 y 5, solo en los requisitos que se relacionen con las funciones críticas de estos niveles.

mas, así como promover mejoras y corrección de errores y *bugs* de los propios productos y sistemas y su eventual modernización. Este aspecto sustentó la **inclusión del nivel TRL 11** en la metodología.

- **Desarrollo de la calculadora:** se desarrolló una calculadora con el fin de establecer pasos específicos que se deben cumplir para cada nivel de TRL, bien como para identificar el tipo de organización responsable de los criterios para alcanzar ciertos pasos, como los órganos de Ciencia y Tecnología (C&T) responsables de la elaboración de la formulación conceptual, a través de la evaluación de prototipos y lotes piloto y aprobación de SMEM; y el Órgano de Dirección General (ODG), responsable por la elaboración de los requisitos operativos y adopción de SMEM.

Tabla 4 - Resumen de la metodología para enmarcar la escala TRL para el EB

Nivel TRL	Descripción
1	Principios básicos observados e informados / modelación teórica: estudios documentados que traten de principios científicos básicos, en los que se puedan identificar aplicaciones potenciales.
2	Concepto tecnológico y/o aplicación formulada: estudios documentados que analizan aplicaciones específicas del objeto (análisis de funcionalidad, rendimiento e identificación de experimentos).
3	Función crítica experimentada y analizada en un ambiente de laboratorio: estudios documentados de experimentos que demuestran la viabilidad de aplicar el objeto en un ambiente simulado de alta fidelidad (especificación de funcionalidades, rendimiento y realización de experimentos).
4	Prueba de concepto validada en un ambiente de laboratorio: funciones críticas de objeto, implementadas en una prueba de concepto, se prueban en un ambiente de laboratorio.
5	Modelo de ingeniería validado en ambiente relevante: funciones críticas de objeto, implementadas en un modelo de ingeniería, se prueban en el ambiente relevante.
6	Demostrador de tecnología validado en un ambiente relevante: funciones críticas de objeto, incluidos los parámetros de rendimiento, las dimensiones y el peso, implementadas en un demostrador de tecnología, se prueban en un ambiente relevante, establecido de acuerdo con los Requisitos Operativos y Técnicos.
7	Demostrador de tecnología integrado en el producto objetivo validado en un ambiente operativo: demostrador de tecnología del objeto se integra en el producto objetivo y sus funciones críticas se prueban en una primera versión del prototipo, en un ambiente operativo y de acuerdo con los Requisitos Operacionales y Técnicos.
8	Prototipo validado en ambiente operativo: el producto objetivo se prueba considerando casi todos los Requisitos Operativos y Técnicos. Este nivel representa el final del desarrollo del producto.

Nivel TRL	Descripción
9	Prototipo evaluado por el órgano competente (evaluación de prototipo): el producto objetivo es evaluado y aprobado por los órganos competentes del DCT, de acuerdo con todos sus Requisitos Operativos y Técnicos.
10	Repetibilidad de la producción evaluada (evaluación del lote piloto): lote piloto evaluado y aprobado por los órganos de C&T y adoptado por el ODG.
11	Producto en funcionamiento / Feedback de usuario procesado: producto mejorado con defectos y <i>bugs</i> corregido en base al feedback del usuario.

Fuente: Los autores (2022).

Nota: El glosario de términos metodológicos se encuentra en el **Apéndice**

Es importante señalar que hasta el nivel 9, la escala TRL para el EB es similar a la escala TRL tradicional. En estos niveles, la personalización está restringida a los criterios que deben cumplirse en cada uno de los nueve niveles, como se describe a continuación.

Buscando el establecimiento de pasos específicos a cumplir en cada nivel de preparación tecnológica, se desarrolló una calculadora, en un ambiente *web*⁴, por la Agencia para la Gestión y la Innovación Tecnológica (AGITEC). La herramienta, a la que se puede acceder en la red corporativa del Ejército (EBNet) en la dirección <http://intranet.agitec.eb.mil.br/calculadora>, permite enmarcar una tecnología en un nivel TRL luego de completar un máximo de 11 (once) preguntas.

A pesar del alcance ampliado en relación a las demás aplicaciones encontradas en la etapa de revisión bibliográfica (CoPS y productos de producción masiva), que implicó la adición de dos niveles a la metodología, el proceso de desarrollo fue exitoso en el sentido de obtener un procedimiento sencillo. La simplicidad es una característica clave para la capacidad prevista de facilitar la comunicación entre una amplia gama de actores con respecto a áreas de actuación y experiencias profesionales.

En la línea de la calculadora presentada por Nolte, Kennedy y Dziegiel (2003), la aplicación sigue el proceso de dos pasos: estimación preliminar y confirmación del nivel de madurez. Además, de manera similar a la calculadora IMATEC de la Agencia Espacial Brasileña (XAVIER *et al.*, 2020), la evaluación del nivel TRL de una tecnología se realiza en relación con un determinado Producto Objetivo⁵.

En la etapa preliminar de estimación del nivel de madurez, como se ilustra en la Figura 3, se identifica el rango de TRL en el que se encuentra el Objeto⁶ es más probable de encontrar: estu-

⁴ Nombre con el que se conoció a la red mundial de ordenadores (Internet) a partir de 1991, cuando se popularizó debido a la creación de una interfaz gráfica que facilitaba el acceso y extendía su alcance al público en general (OXFORD..., 2021).

⁵ Producto o Sistema a desarrollar, compuesto por varias tecnologías críticas y no críticas.

⁶ Se refiere a una tecnología crítica, pero puede representarse mediante un sistema, subsistema o componente (*hardware* o *software*) que, inserto en una estructura jerárquica, integra un sistema o producto (Producto Objetivo).

dios iniciales (TRL 1 a 3); etapa de desarrollo y pruebas (TRL 4 a 6); etapa de integración, diseño y evaluación del prototipo (TRL 7 a 9); etapa de producción y evaluación del lote piloto (nivel 10); y etapa de prueba y *feedback* del usuario (nivel 11).

Figura 3 – Rangos de TRL en los que se puede encontrar el Objeto (paso preliminar de estimación del nivel de madurez)

Fuente: Intranet de AGITEC.

En la etapa de confirmación, a partir de la validación de sus indicadores se elige el nivel más adecuado del rango identificado. El Objeto se clasifica en el nivel más alto en el que se han cumplido todos los indicadores. Los indicadores de la calculadora para cada nivel de TRL se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5 – Resumen de los indicadores para cada nivel en la calculadora TRL para el EB

Nivel TRL	Indicadores
1	<ul style="list-style-type: none"> Definición de los principios científicos básicos del Objeto analizado tales como: formulación de leyes, hipótesis, propiedades básicas, principios teóricos o modelos; Existencia de potenciales aplicaciones prácticas relacionadas con los principios básicos observados.
2	<ul style="list-style-type: none"> Estudios o protección industrial del Objeto que analicen funcionalidades, desempeño e identificación de experimentos, para aplicaciones específicas; Definición de aplicaciones específicas del objeto analizado.
3	<ul style="list-style-type: none"> Estudios o artefactos del Objetos que demuestran experimentos y analicen funcionalidades, desempeño y resultados de experimentos, para aplicaciones específicas; Demostración de la viabilidad de las aplicaciones (p. ej. banco de laboratorio o simulación por computadora con datos reales); Identificación de las interfaces del Objeto con otros Objetos.

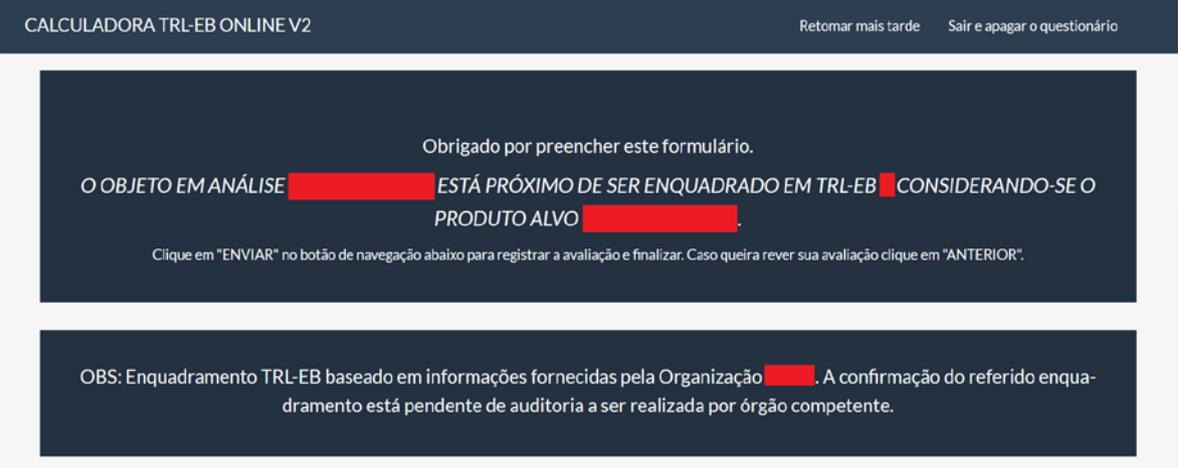
Nivel TRL	Indicadores
4	<ul style="list-style-type: none"> • Especificación de las funciones críticas del Objeto a probar en una prueba de concepto y en un ambiente de laboratorio (funciones críticas de un ambiente de laboratorio); • Borrador de RO y RTLI preliminares; • Resultados de pruebas de concepto en un ambiente de laboratorio que validan con éxito los requisitos de rendimiento e interfaz.
5	<ul style="list-style-type: none"> • Especificación de las funciones críticas del Objeto a probar en un modelo de ingeniería y en el ambiente relevante (funciones críticas del ambiente relevante); • Borrador de RO preliminar y RTLI (con ajustes en relación a la versión TRL 4, si procede); • Resultados de las pruebas del modelo de ingeniería en el ambiente relevante que validan con éxito los requisitos de rendimiento e interfaz.
6	<ul style="list-style-type: none"> • Especificación de las funciones críticas del demostrador, que se probarán en un ambiente relevante, incluidas las relacionadas con las dimensiones y el peso (funciones críticas del ambiente relevante del demostrador de tecnología); • COMOP, CONDOP, RO y RTLI del Producto Objetivo al que está destinado el Objeto analizado; • Los resultados de la prueba del demostrador de tecnología en el ambiente relevante validan con éxito los requisitos de rendimiento, las dimensiones, el peso y de interfaz, y se ajustan a RTLI mapeado en las funciones críticas del ambiente relevante.
7	<ul style="list-style-type: none"> • Especificación de las funciones críticas del demostrador, a ser probadas en un ambiente operativo, incluyendo aquellas que solo se pueden probar cuando está integrado en el Producto Objetivo (Funciones críticas del ambiente operativo); • Los resultados de la prueba del demostrador de tecnología del ambiente operativo validan con éxito los requisitos de rendimiento e interfaz y se ajustan a RTLI mapeado en las funciones críticas del ambiente operativo.
8	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo completo del prototipo del Producto Objetivo, que integra el Objeto analizado, para ser probado en un ambiente operativo; • Resultados de pruebas de prototipos en ambientes operativos que validan con éxito casi todos los requisitos absolutos de RO y RTLI.
9	<ul style="list-style-type: none"> • Resultados de pruebas de prototipos en el ambiente operativo que validan con éxito todos los RO y RTLI; • Informe de Evaluación aprobado por el órgano C&T competente.
10	<ul style="list-style-type: none"> • Lote experimental o preliminar de un producto, relativamente pequeño, listo para ser evaluado, con el fin de probar la reproducibilidad de una línea de producción a pequeña escala; • Informe de evaluación del lote piloto aprobado por el órgano de C&T competente; • Acto de adopción del Producto Objetivo.
11	<ul style="list-style-type: none"> • Informe de Experimentación Doctrinal; • Nueva versión del Prototipo en uso, con la información de uso debidamente implementada.

Fuente: Los autores (2022).

Nota: El glosario de términos metodológicos se encuentra en el **Apéndice**

Después de la validación de indicadores en la segunda etapa de llenado, como se ilustra en la Figura 4, la calculadora muestra el nivel de TRL en el que mejor se ajusta el Objeto bajo análisis, considerando el Producto Objetivo asociado. Cabe señalar que la clasificación realizada por la calculadora se basa únicamente en la indicación de los documentos que prueban el logro de los indicadores para un determinado nivel de TRL. La confirmación del marco mencionado requiere la realización de una auditoría por parte de un órgano competente, si existe interés institucional en la tecnología.

Figura 4 – Resultado del encuadramiento realizado por la calculadora TRL para el EB



Fuente: Intranet de AGITEC.

Es importante resaltar que la herramienta tiene una madurez considerable en cuanto a su uso dentro del Ejército, dado que el proceso de desarrollo tuvo dos rondas/versiones con gran participación de las ICT (Institución Científica, Tecnológica y de Innovación) del EB. La calculadora ya cuenta con 520 accesos en su versión actual (versión 2).

5 Presentación y discusión de resultados

A partir de los datos presentados, se verificó que la EPT basada en la escala TRL es un proceso que tiene como objetivo minimizar los problemas en la definición de la etapa de maduración tecnológica, así como proporcionar una comunicación eficiente entre especialistas, gerentes y otras partes interesadas en las organizaciones que adquieren productos y sistemas de alta tecnología.

Como la escala TRL es la herramienta que subyace en todo el proceso de EPT, se constató que la personalización del proceso de EPT desde la perspectiva de una organización focal comienza con la personalización de la metodología para enmarcar la escala TRL.

En el caso de estudio del DCT, la organización focal de una red para el desarrollo de tecnologías y productos de defensa, el proceso de personalización de la metodología de encuadramiento en la escala TRL se escalonó en 9 (nueve) pasos:

1) Diagnóstico inicial: tal como lo presentan França Junior y Galdino (2019), es necesario realizar un diagnóstico de la organización, con el fin de identificar, en particular, sus fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas; sus características, especificidades y cultura organizacional; y los objetivos previstos con la implementación de una herramienta de comunicación capaz de estandarizar el conocimiento en relación con el nivel de madurez de una determinada tecnología. En el diagnóstico del DCT, se identificó la necesidad de personalizar la metodología para la elaboración de la escala TRL, dado que el enfoque metodológico original no atendía plenamente a las especificidades de la organización. En este sentido, se señalaron dos factores como premisas para el proceso de personalización:

a. Cobertura: ampliar el alcance relacionado con los productos (desde CoPS hasta productos producidos en masa) y enfocarse en la comunicación entre una amplia gama de actores sobre áreas de actividad y experiencias profesionales; y

b. Sencillez: desarrollo de una herramienta de fácil acceso y manejo que facilite el proceso de auditoría de las evaluaciones realizadas (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2019);

2) Revisión bibliográfica: análisis de personalizaciones realizadas por organizaciones focales que desarrollan productos y sistemas de alta tecnología. En el estudio de caso de DCT, se analizaron las siguientes organizaciones de enfoque: DoD (UNITED STATES, 2009), DoE (UNITED STATES, 2011), ESA (ESA, 2017), DCTA (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017) y AEB (XAVIER *et al.*, 2020). Como se resume en la Tabla 1, este análisis identificó dos factores principales para personalizar la metodología de encuadre en la escala TRL: adecuación a la cultura organizacional y desarrollo de calculadoras;

3) 1º borrador de la calculadora: Con base en estos dos factores de personalización, un grupo limitado de especialistas preparó un primer borrador de una calculadora TRL para el EB;

4) *Workshop* para la discusión de la calculadora: Para discutir el primer borrador de la calculadora, un *workshop* con varios especialistas de Organizaciones Militares que trabajan desde la investigación básica hasta el uso del producto, barriendo así todas las rangos de la escala TRL;

5) Nueva calculadora (versión 1): perfeccionamiento del primer borrador de la calculadora a partir de las discusiones en el *workshop*.

6) Uso experimental en casos reales: para la experimentación de la primera versión de la calculadora, fueron seleccionados tres programas en curso en el DCT, el programa de Directriz Estratégica para la Formulación Conceptual de Medios Blindados del Ejército Brasileño (EB) (PROJETO..., 2019), el programa Radio Definido por *Software* (PRADO FILHO; GALDINO; MOURA, 2017) y el programa Misil Tierra – Tierra 1.2 (BRASIL, 2022). Estos tres programas fueron elegidos porque se encuentran en diferentes etapas de desarrollo, por lo que sus tecnologías críticas, o subsistemas, estarían bien distribuidas a lo largo de la escala TRL, brindando un análisis completo;

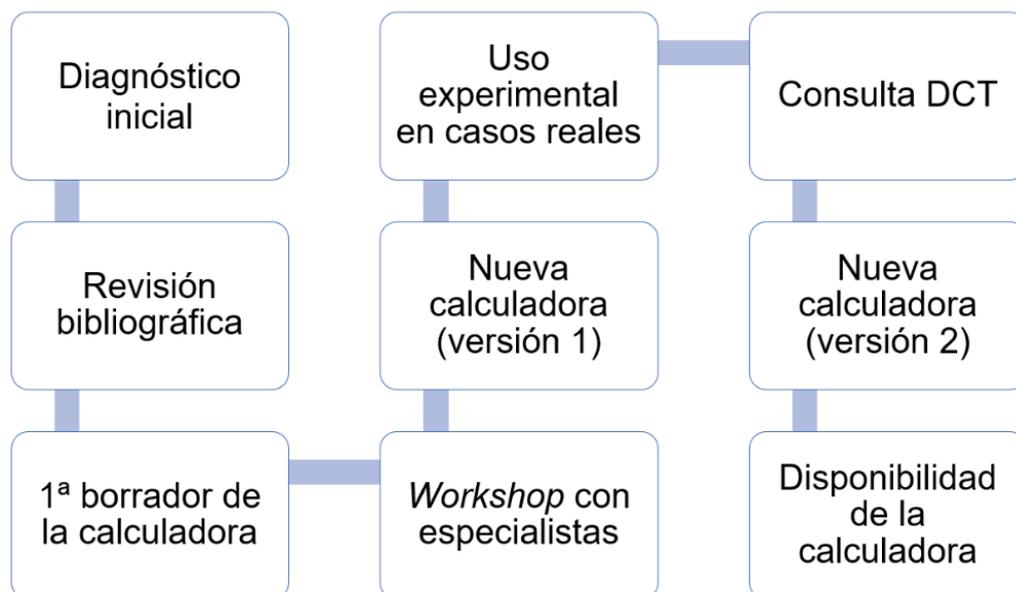
7) Consulta DCT: después del perfeccionamiento de la calculadora con el *workshop* y con el uso experimental en casos reales, se realizó una consulta en el ámbito del DCT para validar los avances realizados;

8) Nueva calculadora (versión 2): perfeccionamiento de la calculadora basada en información de la ronda de consulta al DCT; y

9) Disponibilidad de la calculadora: finalmente, luego del proceso de perfeccionamiento y validación de la herramienta, se puso a disposición la calculadora para uso del EB, accesible en la red corporativa del Ejército (EBNet) en la dirección <http://intranet.agitec.eb.mil.br/calculadora>.

Los 9 (nueve) pasos de este proceso de personalización están representados en el diagrama de la Figura 5.

Figura 5 – Etapas del proceso de desarrollo de una metodología de encuadramiento en la escala TRL para el Ejército Brasileño



Fuente: Los autores (2022).

Después de ofrecer una visión general del proceso de adaptación personalizada llevado a cabo en el ámbito del EB, es necesario promover la discusión sobre algunos puntos importantes identificados a lo largo del estudio.

5.1 Adhesión a la revisión bibliográfica

En primer lugar, cabe destacar la adherencia del estudio de caso a la revisión bibliográfica. Fue posible verificar que los dos factores identificados durante el análisis de la literatura – cultura organizacional y método de encuadramiento (calculadora) – fueron necesarios y suficientes para el desarrollo de una metodología de encuadramiento en la escala TRL adaptada a las peculiaridades del Ejército Brasileño.

En este contexto, un punto que merece mayor atención es el detalle del esfuerzo requerido para el desarrollo de la calculadora TRL. Como se muestra en la Figura 5, este esfuerzo requirió nueve pasos y la participación de docenas de actores. En la literatura, el esfuerzo por desarrollar una calculadora TRL no se detalla ni se mide.

5.2 Necesidad de incluir niveles adicionales

La adecuación de la metodología desarrollada al Instructivo General para la Gestión del Ciclo de Vida de los SMEM (IG 01-018) (BRASIL, 2016) se basó en tres aspectos: la capacidad de inferir sobre la reproducibilidad de los productos hechos en grandes cantidades a través de la evaluación de lotes piloto, la necesidad de una evolución gradual de los requisitos técnicos y operativos (RO y RTLI), y la consideración del *feedback* del usuario durante la experimentación doctrinal, visando el perfeccionamiento o desarrollo de nuevas versiones de los productos y sistemas.

En cuanto a la capacidad de inferir sobre la reproducibilidad de productos producidos en grandes cantidades a través de la evaluación del lote piloto, fue posible identificar que la escala TRL original no tenía ese objetivo. El contexto de P&D de la NASA es muy complejo, como los telescopios de largo alcance o los cohetes espaciales, lo que implica muchos componentes personalizados y pocas unidades producidas (a veces una única unidad). Estas características son típicas de CoPS (HOBDDAY, 1998), que difieren de los productos producidos en grandes cantidades (UNITED STATES, 2020b). El EB emplea productos de diversos grados de complejidad y volumen de producción, que van desde los producidos en decenas y cientos de unidades, hasta los producidos en masa. Esta amplia gama de productos comprende radares, tanques, misiles, radios tácticas, drones, armas ligeras, chalecos de protección balística y municiones. Este aspecto sustentó la inclusión del nivel TRL 10 en la metodología, que se refiere a la repetibilidad de la producción evaluada (evaluación del lote piloto).

Otro aspecto identificado como no cubierto por la escala TRL original fue la consideración del *feedback* del usuario. El Ejército Brasileño prevé el uso del *feedback* del usuario durante la experimentación doctrinal, posterior a la adopción y distribución del producto,

visando la generación de información para su perfeccionamiento o desarrollo de nuevas versiones (KIRSCHENBAUM *et al.*, 2020; LORD *et al.*, 2019; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2020; STRAUB, 2015). La estructura organizacional del EB permite la recolección de datos de los productos y sistemas de defensa en operación (en uso por parte del usuario), facilitando así la obtención de información importante para sustentar decisiones para iniciar nuevas investigaciones, realizar mejoras en demostradores de tecnología y de crear prototipos de nuevas versiones de productos y sistemas, bien como promover mejoras y correcciones de errores y *bugs* de los propios productos y sistemas y su eventual modernización. Este aspecto sustentó la inclusión del nivel TRL 11 en la metodología, que se refiere al producto en operación/ *feedback* de usuario procesado.

5.3 Factores críticos del éxito

Durante el desarrollo de una metodología para enmarcar la escala TRL para el EB, fue posible identificar dos factores críticos que permitieron obtener un buen resultado del esfuerzo realizado: enfoque multidisciplinario y gobernanza favorable.

En cuanto a la multidisciplinariedad, cabe señalar que la participación de profesionales de diferentes áreas de actuación (docencia, investigación, contratos, gestión, pruebas y evaluación, innovación tecnológica y doctrina militar) y procedencia (militares, funcionarios públicos y de empresas de la Base Industrial de Defensa - BID) fue de fundamental importancia para la incorporación de diferentes puntos de vista en la metodología y el establecimiento de una base común de comunicación. Además, la discusión y experimentación de la calculadora TRL por diferentes actores permitió la revisión de su concepción, la eliminación de redundancias y la conciliación de la eficacia con la sencillez, considerando que la evaluación TRL por la herramienta para el EB es accesible (ambiente *web*) y fácil de operar (requiere un número máximo de respuestas inferior al requerido por las calculadoras analizadas en la revisión de la literatura). Aún en cuanto a la sencillez, se destaca que la aplicación facilita los procesos de auditoría, ya que incorpora la indicación de documentos de respaldo del cumplimiento de indicadores en medio de las evaluaciones.

En cuanto a la gobernabilidad favorable, el apoyo de la Alta Dirección del área de Ciencia y Tecnología del Ejército fue fundamental para el involucramiento de varios profesionales en la organización, así como para la realización de las rondas de consulta que permitieron la mejora de la metodología.

5.4 Generalización del proceso de personalización de la metodología de encuadramiento en la escala TRL

Desde el enfoque *bottom-up* (WALDEN *et al.*, 2015), es posible extrapolar el proceso de personalización realizado en el ámbito del DCT a un proceso genérico a realizar por organizaciones focales que desarrollan productos y sistemas de alta tecnología. Este proceso genérico puede ser representado por 3 (tres) pasos:

1) Diagnóstico: realización de diagnóstico de la organización, particularmente en lo que se refiere a sus fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas; sus características, especificidades y cultura organizacional; y objetivos previstos con la implementación de una herramienta de comunicación que tiene como objetivo estandarizar el conocimiento en relación con el nivel de madurez de una determinada tecnología. Este diagnóstico indica dos caminos posibles:

a. Si se encuentra que el enfoque original no cumple completamente con las especificidades de la organización, se indica la necesidad de personalizar la metodología para enmarcar la escala TRL;

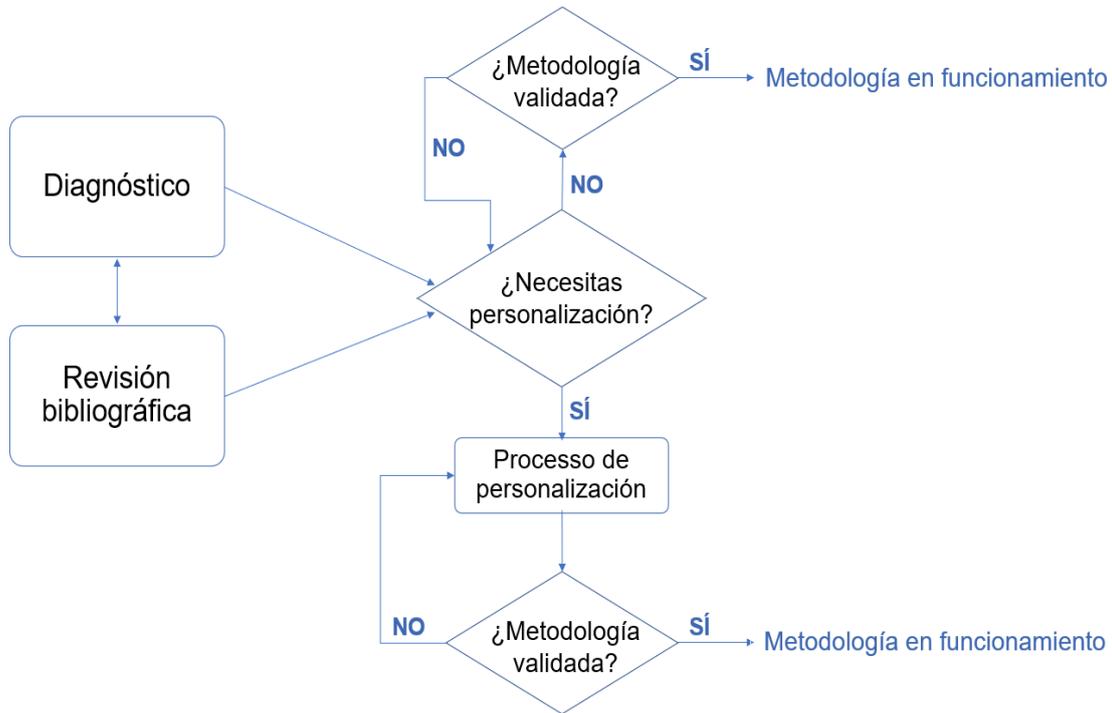
b. En caso contrario, se indica la posibilidad de adoptar la metodología original por parte de la organización. Si es necesario, se pueden hacer pequeños ajustes, por ejemplo, traducción y/o adaptación de lenguaje;

2) Revisión bibliográfica: Para rectificar o ratificar el diagnóstico inicial, es necesario analizar procesos de personalización de la metodología de encuadramiento en la escala TRL realizados por organizaciones focales que desarrollan productos y sistemas de alta tecnología para comprender el estado del arte asociado y construir un marco comparativo;

3) Proceso iterativo de personalización: una vez que se confirma la necesidad de personalización, se debe iniciar el proceso de desarrollo de una metodología para enmarcar la escala TRL personalizada para las características específicas de la organización. El proceso se considera finalizado cuando las rondas de validación de la metodología dentro de la organización se consideran suficientes. Se sugiere que el desarrollo de la metodología vaya acompañado de la implementación de un método de encuadramiento (calculadora TRL). Esta herramienta simplifica la determinación del nivel de TRL apropiado para una tecnología, además de brindar repetibilidad y consistencia al proceso (UNITED STATES, 2020a). Además, la evaluación no estandarizada de la etapa de preparación de una tecnología a menudo conduce a discrepancias entre el nivel de TRL percibido por las diferentes partes involucradas en un proyecto (ALTUNOK; ÇAKMAK, 2010; FRERKING; BEAUCHAMP, 2016; MUDA; GOVINDARAJU; WIRATMADJA, 2022; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003).

Los 3 (tres) pasos del proceso genérico de personalización de la metodología de encuadramiento en la escala TRL para organizaciones focales que desarrollan productos y sistemas de alta tecnología se resumen en la Figura 6.

Figura 6 – Proceso genérico para personalizar la metodología de encuadramiento en la escala TRL para organizaciones focales que desarrollan productos y sistemas de alta tecnología



Fuente: Los autores (2022).

6 Consideraciones finales

El presente estudio mostró que la personalización de la EPT basada en la escala TRL es un proceso laborioso y complejo, y presentó los primeros avances en la adaptación de la EPT a la gestión del ciclo de vida de SMEM por parte del EB (desarrollo de una metodología para enmarcar la escala TRL).

El escenario actual de especificación de procesos EPT está más extendido en países económica y tecnológicamente desarrollados, cuyas organizaciones son capaces de insertar la maduración de tecnologías críticas dentro de los modelos de gestión del ciclo de vida y *roadmaps* tecnológicos de sus productos y sistemas complejos (ESA, 2017; UNITED STATES, 2009, 2011).

Buscando esta dirección, los países con desarrollo tardío, como Brasil, cuyas altas demandas de tecnología muchas veces no se satisfacen internamente, deben personalizar los procesos de EPT y de gestión del ciclo de vida de los sistemas para conciliar estrategias de corto y de largo plazo en la obtención y maduración de tecnologías críticas (FRANÇA JUNIOR; GALDINO, 2022).

Dentro de esta perspectiva, en el ámbito de los procesos de EPT en el ámbito del EB, se destacan como propuestas de trabajos futuros los siguientes temas: perfeccionamiento del modelo de gestión del ciclo de vida de SMEM/procesos de EPT con el objetivo de conciliar estrategias

de corto plazo y largo plazo en la obtención y maduración de tecnologías críticas; definición de método para la selección de tecnologías críticas; definición del método de selección del equipo de EPT y su rol a lo largo de los hitos de toma de decisiones del ciclo de vida de SMEM; definición de métodos para la maduración de tecnologías críticas; y personalización de la metodología de encuadramiento de escala TRL para la evaluación de componentes y subsistemas de *hardware*, *software* y/o en el área biomédica.

En un contexto más amplio, el artículo propuso, basado en el estudio de caso del DCT, un proceso genérico para personalizar la metodología de encuadramiento en la escala TRL para organizaciones focales que desarrollan productos y sistemas de alta tecnología. En este esfuerzo de generalización, futuros trabajos podrán abordar el uso de la EPT basada en la escala TRL como herramienta de gestión y comunicación en los Sistemas Sectoriales de Innovación (SSI), como son, a nivel nacional, los SSI de petróleo y gas y de la agroindustria (SCHONS; PRADO FILHO; GALDINO, 2022).

References

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>. Acessado 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. Acessado 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. Acessado 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. Disponible en: <https://artes.esa.int/sites/default/files/ECSS-E-HB-11A%281March2017%29.pdf>. Accesado el: 29 ago. 2022.

ESA. **Technology readiness levels in ARTES Technology & product developments**. Paris: European Space Agency, 2020. Disponible en: 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. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/ea/a/4gMzWdcjVXCMp5XyNbGYDMQ/?lang=pt>. Accesado el: 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. Disponible en: <http://ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RMM/article/view/1910>. Accesado el: 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. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01249946/document>. Accesado el: 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. Disponible en: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/3514/Flavio%20Lima.pdf>. Accesado el: 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. Disponible en: <https://tecnodefesa.com.br/projeto-nova-couraca-roadmap-da-tropa-blindada-do-brasil-aco/>. Accesado el: 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. Disponible en: <https://fdocumentos.tips/document/revista-gestao-em-engenharia-mecitabr-cgergeartigos-de-padronizar-os.html?page=1>. Accesado el: 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). Disponible en: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1105846.pdf>. Accesado el: 25 ago. 2022.

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

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

UNITED STATES. Departmente of Energy. **Technology readiness assessment guide**: springer reference. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2011. Disponible en: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04-admchg1/@images/file>. Accesado el: 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. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/jatm/a/L6KRCWrww5v5ySWN5h738Nv/?format=pdf&lang=en>. Accesado el: 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.

Apéndice

Ambiente de laboratorio: ambiente controlado que permite probar funciones críticas y evaluar el desempeño de una tecnología, subsistema o componente en particular.

Ambiente operativo: ambiente real que permite la evaluación de algunos o todos los requisitos operativos especificados para la evaluación de un producto.

Ambiente relevante: ambiente de prueba que incorpora aspectos de un ambiente controlado y un ambiente real, lo que permite la simulación de funciones críticas y no críticas de un modelo de ingeniería o demostrador de tecnología.

Componente: elemento más básico perteneciente a un subsistema, modelo de ingeniería o prueba de concepto.

Demostrador de tecnología: subsistema o sistema que representa una tecnología crítica. Puede verse como una evolución de un modelo de ingeniería y se utiliza para demostrar su viabilidad técnica en un ambiente operativo, con el fin de verificar las especificaciones técnicas y los requisitos operativos más relevantes del producto objetivo. Ej.: circuito electrónicos de transmisión y recepción de datos encapsulados, a fin de permitir la portabilidad, cumpliendo con los requisitos operacionales y técnicos previos de desempeño, dimensiones y peso.

Documentación Científica: documento que contiene un texto científico destinado a discutir fenómenos que aún no se comprenden completamente. Puede publicarse en revistas, actas, congresos, etc.

Funciones Críticas: funciones principales del objeto evaluado. Son las funcionalidades principales, de un subsistema o componente, a probar para cada nivel de preparación tecnológica. La cantidad de funcionalidad crítica aumenta a medida que se alcanzan los niveles de preparación. Por lo tanto, cada nivel de TRL (del 4 al 7) tiene un conjunto de funciones críticas predefinidas que deben probarse con éxito para alcanzar ese nivel.

Función crítica de ambiente de laboratorio: son las funciones críticas de una prueba de concepto para ser probada en un ambiente de laboratorio, y que deben ser definidas para lograr TRL 4. Ej.: circuito electrónico para transmitir y recibir datos, montado en *protoboard* siendo alimentado por una fuente de alimentación externa y un algoritmo de procesamiento instalado en la computadora de escritorio. Esta prueba de concepto tiene la función crítica de transmitir y recibir datos encriptados. Puede probarse en el laboratorio sin necesidad de evaluar la distancia y la velocidad de transmisión.

Función crítica del ambiente relevante: son las funciones críticas que deben probarse en el ambiente relevante.

En el caso de un modelo de ingeniería, estas funciones críticas deben incluir, además de las especificadas en el TRL 4, otras funciones que representen aún más del sistema real para lograr el TRL 5. Ej.: circuito electrónico de transmisión y recepción de datos montado en una placa de circuito impreso con fuente de alimentación integrada y antena de potencia, y algoritmo de procesamiento instalado en FPGA. Este modelo de ingeniería tiene la función crítica de transmitir y recibir datos encriptados a una distancia y velocidad específicas. Puede probarse en campo abierto para evaluar no solo la capacidad de transmisión, sino también su distancia y velocidad.

En el caso de un demostrador de tecnología, estas funciones críticas deben incluir, además de las especificadas en el TRL 4 y 5, las relacionadas con el rendimiento, el peso y las dimensiones, definiendo así un nuevo conjunto de funciones críticas para lograr el TRL 6. Ej.: circuitos electrónicos de transmisión y recepción de datos encapsulados para permitir la portabilidad, cumpliendo con los requisitos previos de desempeño, dimensiones y peso. Este demostrador de tecnología tiene las funciones críticas de transmitir y recibir datos encriptados a una distancia y velocidad específicas y ser integrable en un dispositivo de comunicación portátil. Debe ser probado en un ambiente relevante para evaluar su desempeño en términos de distancia, velocidad y capacidad de transmisión, además de tener dimensiones y peso viables para ser integrado a un dispositivo de comunicación que sea portátil.

Función de ambiente operativo crítico: son las funciones críticas de un demostrador de tecnología que se probarán en un ambiente operativo cuando se integren en el producto de destino, y que se deben definir para lograr el TRL 7. Además de las funciones críticas probadas en TRL 6, también se deben considerar otras funciones críticas del demostrador de tecnología, que solo se pueden probar cuando está integrado en el producto objetivo. Ej.: circuito electrónico de transmisión y recepción de datos integrado en un dispositivo portátil de comunicación. Este demostrador de tecnología, cuando se integra a un dispositivo de comunicación portátil, debe tener las mismas funciones críticas que el TRL 6, es decir, transmitir y recibir datos encriptados a una distancia y velocidad específicas y tener dimensiones compatibles con la portabilidad del dispositivo de comunicación al que se integrará. Además, su rendimiento de transmisión debe ser compatible con la capacidad de procesamiento del dispositivo de comunicación.

Lote Piloto: producción experimental o preliminar de un producto relativamente pequeño, con el objetivo de adaptar el prototipo y probar la respectiva línea de producción.

Modelo de ingeniería: una disposición de componentes integrados que proporciona una representación de un sistema/subsistema que se puede utilizar para determinar la viabilidad de una prueba de concepto. Puede verse como una evolución de una prueba de concepto, donde los componentes y equipos de laboratorio se reemplazan por modelos cercanos al subsistema real para que puedan probarse en un ambiente relevante. Ej.: circuito electrónico de transmisión y recepción de datos montado en una placa de circuito impreso con fuente de alimentación integrada, antena de alta potencia y algoritmo de procesamiento instalado en FPGA.

Objeto: se refiere a una tecnología crítica, pero puede ser representada por un sistema, subsistema o componente (*hardware* o *software*) que, insertado en una estructura jerárquica, integra un sistema o producto (producto objetivo).

Investigación Aplicada: investigación aplicada con el objetivo de desarrollar tecnologías o técnicas para intervenir y cambiar fenómenos naturales o sociales. Puede ser apoyado por la investigación básica.

Investigación básica: también llamada investigación pura o investigación fundamental, es la investigación cuyo objetivo es el avance de teorías científicas tendientes a la predicción o comprensión de fenómenos naturales o sociales. Tiene una naturaleza puramente teórica que pretende ampliar la comprensión de fenómenos o comportamientos sin, no obstante, buscar resolver o tratar ningún problema asociado con tales fenómenos.

Producto Objetivo: producto o Sistema a desarrollar, compuesto por varias tecnologías críticas y no críticas.

Propiedad Intelectual: incluye patentes, marcas, diseños industriales, indicaciones geográficas, etc.

Prototipo: primera versión del producto de destino que se producirá y operará. Su objetivo es validar todos los requisitos técnicos y operativos especificados.

Prueba de concepto: un arreglo de componentes integrados que tiene como objetivo validar un concepto científico o las funciones principales de una tecnología (funciones críticas). Por lo general, esta disposición está integrada con equipos y componentes de laboratorio y componentes de "estantería". Ej.: circuito electrónico para transmitir y recibir datos, montado en *protoboard* siendo alimentado por una fuente de alimentación externa y un algoritmo de procesamiento instalado en la computadora de escritorio.

Requerimientos Operativos (RO): documento que sigue los condicionantes doctrinarios y operativos en el proceso de obtención de un SMEM, que fundamenta sus características restringidas a aspectos operativos.

Requerimientos Técnicos, Logísticos e Industriales (RTL): documento que se deriva de los requisitos operativos y consiste en el establecimiento de las características técnicas, logísticas e industriales que debe tener el sistema o material para cumplir con los requisitos operativos establecidos.

Requisitos Operativos (RO) Preliminares: requisitos que describen apenas las principales funcionalidades operativas de la aplicación (o aplicaciones) que están relacionadas con la tecnología evaluada. Estos requisitos están idealmente elaborados en TRL 4 y 5 y pueden ser elaborados por el propio equipo de desarrollo si tienen conocimientos básicos de las necesidades del usuario, o estos pueden ser extraídos de estándares técnicos. Ej.: para el objeto "módulo de recepción y transmisión de datos", un RO preliminar para las aplicaciones de "radio definido por *software* del vehículo" o "radio definido por *software* portátil" sería: "el radio debe transmitir y recibir datos de texto, audio y video, manteniendo un enlace de al menos 20 km y en vista directa".

Requisitos Técnicos, Logísticos e Industriales (RTLI) Preliminares: requisitos que describen apenas las principales funcionalidades técnicas de la aplicación (o aplicaciones) que están relacionadas con la tecnología evaluada y sus funciones críticas del ambiente de laboratorio. Estos requisitos están idealmente elaborados en TRL 4 y 5 y pueden ser elaborados por el propio equipo de desarrollo si tienen conocimientos básicos de las necesidades del usuario, o estos pueden ser extraídos de estándares técnicos. Ej.: para el objeto "módulo de recepción y transmisión de datos", un RTLI preliminar para las aplicaciones de "radio definida por *software* de vehículos" o "radio definida por *software* portátil" sería: La radio debe transmitir y recibir datos, asegurando la transferencia de 300 (trescientos) kB en un máximo de tres minutos a la vista en un rango entre 20 y 40 km.

Sistemas de Productos Complejos (CoPS): bienes de capital, sistemas, redes, unidades de control, paquetes de *software*, construcciones y servicios específicos, de alto costo y alta tecnología (HOBDDAY, 1998).

Subsistema: una disposición de componentes integrados que realizan una determinada función dentro de un sistema.

Tecnología crítica: tecnología perteneciente a un producto objetivo que es esencial para el logro de sus requisitos operativos y técnicos obligatorios. Puede tratarse de una tecnología nueva, o no dominada en el país, cuya adquisición (adquisición o desarrollo) sea de extrema prioridad, según criterios de disponibilidad en el mercado nacional e internacional, y vulnerabilidad logística y operativa.

