

APLICAÇÃO DO TECHNOLOGY READINESS LEVELS (TRL) NA AVALIAÇÃO DA MATUREZA TECNOLÓGICA EM PROJETO DE P&D DE UMA EMPRESA BRASILEIRA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

REINALDO BORSATO RODRIGUES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI (UNIFEI)

SANDRA MIRANDA NEVES

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI (UNIFEI)

MATHEUS HENRIQUE DE CARVALHO SILVA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI (UNIFEI)

EDUARDA GANDINI CALHEIROS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI (UNIFEI)

ANDRÉA APARECIDA DA COSTA MINEIRO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI (UNIFEI)

Agradecimento à órgão de fomento:

Os autores agradecem ao apoio da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), do Mestrado Profissional em Administração (MPA) do IEPG - UNIFEI e Fapemig.

APLICAÇÃO DO *TECHNOLOGY READINESS LEVELS* (TRL) NA AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA EM PROJETO DE P&D DE UMA EMPRESA BRASILEIRA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

1 INTRODUÇÃO

A transformação digital nas empresas busca utilizar plenamente as tecnologias da informação para fortalecer a sobrevivência organizacional e impulsionar o desempenho competitivo (Men *et al.*, 2023). Nesse cenário, a capacidade de inovar torna-se um diferencial estratégico, e a metodologia *Technology Readiness Levels* (TRL), ou Nível de Maturidade de Tecnologia, desponta como ferramenta fundamental para reduzir incertezas e apoiar a gestão do risco tecnológico. Desenvolvida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a escala TRL permite avaliar o grau de maturidade de uma tecnologia, sendo amplamente utilizada em Programas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI) para classificar o estágio de desenvolvimento das tecnologias e apoiar a tomada de decisões estratégicas (ANEEL, 2024). No Brasil, sua aplicação é incentivada e referenciada por importantes instrumentos e agências de fomento. A Lei 11.196/2005, conhecida como Lei do Bem, estabelece benefícios fiscais que alavancam o potencial inovador das empresas (Chagas de Medeiros, 2024). Agências como a EMBRAPPI também utilizam a escala para definir os critérios de seus projetos, exigindo níveis de maturidade específicos conforme o edital (EMBRAPPI, 2020; EMBRAPPI, 2024). A relevância da metodologia se estende a setores estratégicos, como o militar, a exemplo da sua utilização pela Força Aérea Brasileira na Operação Cruzeiro (FAB, 2022), e também é validada em aplicações internacionais, como no projeto de um SONAR hidrográfico mapeado entre os níveis TRL 3 e 7 (Riordan *et al.*, 2019). Contudo, apesar de sua crescente adoção, percebe-se que o desenvolvimento de novos produtos tecnológicos ainda apresenta deficiências, principalmente na avaliação e gestão do risco tecnológico inerente ao processo de P&D. Assim, emerge o seguinte problema de pesquisa: De que forma a metodologia TRL pode ser implementada para avaliar e gerir a evolução da maturidade tecnológica em projetos de PD&I, integrando-se aos processos de gestão já existentes em uma empresa de base tecnológica?

Para responder a essa questão, o objetivo geral deste trabalho é analisar a implantação da metodologia TRL para a medição do nível de maturidade tecnológica das diversas etapas que compõem um projeto inovador de P&D, a partir da aplicação em uma empresa brasileira da área de automação industrial. Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos: (i) apresentar as contribuições da implantação da metodologia TRL em empresas de base tecnológica; (ii) identificar em um projeto de P&D quais são os níveis de prontidão tecnológica em cada etapa e as tecnologias que compõem o seu desenvolvimento; e (iii) validar o estudo por meio da implantação e verificação de resultados em um projeto real, de forma a integrar a metodologia aos processos de gestão já existentes na empresa. Como delimitação, ressalta-se que os atuais processos de gestão da empresa já se encontram consolidados, e o objetivo não é refazê-los, mas sim propor a integração da metodologia TRL como ferramenta complementar. Para alcançar tais objetivos, o procedimento metodológico adotado foi a pesquisa-ação, desenvolvida na empresa Sense Eletrônica LTDA, líder brasileira na área de sensores industriais. O objeto de estudo selecionado pelos gestores e pelos pesquisadores foi o projeto de desenvolvimento de um Sensor Ultrassônico Industrial, um produto estratégico e de alta complexidade tecnológica para a empresa.

A realização desta pesquisa justifica-se por múltiplos fatores. Primeiramente, pela relevância do tema, visto que a metodologia TRL, embora consolidada na área aeroespacial, tem seu uso cada vez mais extrapolado para diversas áreas de desenvolvimento de produtos de ponta. Soma-se a isso a relevância do objeto de estudo, uma empresa que detém tecnologias inovadoras com potencial de impacto mundial, cuja análise de desenvolvimento pode destacar a competitividade

da indústria nacional. No campo acadêmico, a pesquisa oferece uma contribuição ao apresentar novas possibilidades de aplicação para a metodologia TRL e, como contribuição tecnológica, propõe um novo processo integrado à gestão da empresa, passível de ser replicado em outros projetos.

O artigo está estruturado em cinco seções. A primeira seção introduz o tema e apresenta os objetivos da pesquisa. A segunda seção aborda a fundamentação teórica. A terceira seção descreve a metodologia adotada e o objeto de estudo. Na quarta seção, são analisados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, a quinta seção apresenta as conclusões e as principais contribuições da pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Technology Readiness Levels* (TRL)

A necessidade de avaliar o estágio de desenvolvimento de novas tecnologias levou à criação da metodologia *Technology Readiness Levels* (TRL). Sua origem remonta aos esforços da NASA, que já em 1991 utilizava o conceito para organizar seu planejamento tecnológico no âmbito do programa espacial civil (Nasa, 2007). Contudo, o marco para a formalização e ampla disseminação da metodologia ocorreu em 1995, com a publicação do influente "*White Paper*" de John Mankins. Nesse documento, foi introduzida a hoje consolidada escala de nove níveis, com definições e exemplos que se tornaram um padrão global para classificar a jornada de uma tecnologia desde sua concepção até a operação plena (Mankins, 1995; Yfanti; Sakkas, 2024). A estrutura de nove níveis, cujas definições originais de Mankins (1995) são detalhadas no Quadro 1, estabelece uma progressão lógica.

Quadro 1. Definições originais do TRL

TRL	Definição
1	Princípios básicos observados e reportados
2	Conceito tecnológico e/ou aplicação formulada
3	Prova de conceito analítica e experimental de características e/ou funções críticas
4	Verificação funcional de componente e/ou placa de ensaios em ambiente laboratorial
5	Verificação da função crítica de componente e/ou placa de ensaios em ambiente relevante
6	Demonstração do protótipo do sistema e/ou subsistema em um ambiente relevante na terra
7	Demonstração do protótipo do sistema em um ambiente espacial
8	Sistema real concluído e qualificado para voo por meio de teste e demonstração (solo ou espaço)
9	Sistema real comprovado em voo por meio de operações de missão bem-sucedidas

Fonte: Adaptado de Mankins (1995).

O sucesso e a clareza da metodologia TRL impulsionaram sua rápida disseminação para muito além do setor espacial. A estrutura foi adaptada para pelo menos 12 setores distintos, gerando dezenas de novas escalas de prontidão para áreas que vão de sistemas biomédicos e *software* a processos químicos e energias alternativas, como documentado por Nolte (2011). Essa ampla adoção culminou em sua institucionalização por grandes organizações globais a partir de 2010, incluindo o Departamento de Defesa dos EUA (DoD), a Agência Espacial Europeia (ESA) e a Comissão Europeia (EC), que passou a referenciá-la em seus projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (EARTO, 2014).

O ápice desse movimento de formalização ocorreu com a padronização internacional da metodologia para o setor que lhe deu origem. Em 2013, foi criada a norma ISO 16290, denominada "*Space Systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment*" (ISO, 2013). Posteriormente, essa diretriz global foi internalizada no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que traduziu seu conteúdo e publicou, em 2015, a norma ABNT NBR ISO 16290, intitulada "Sistemas espaciais - Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação".

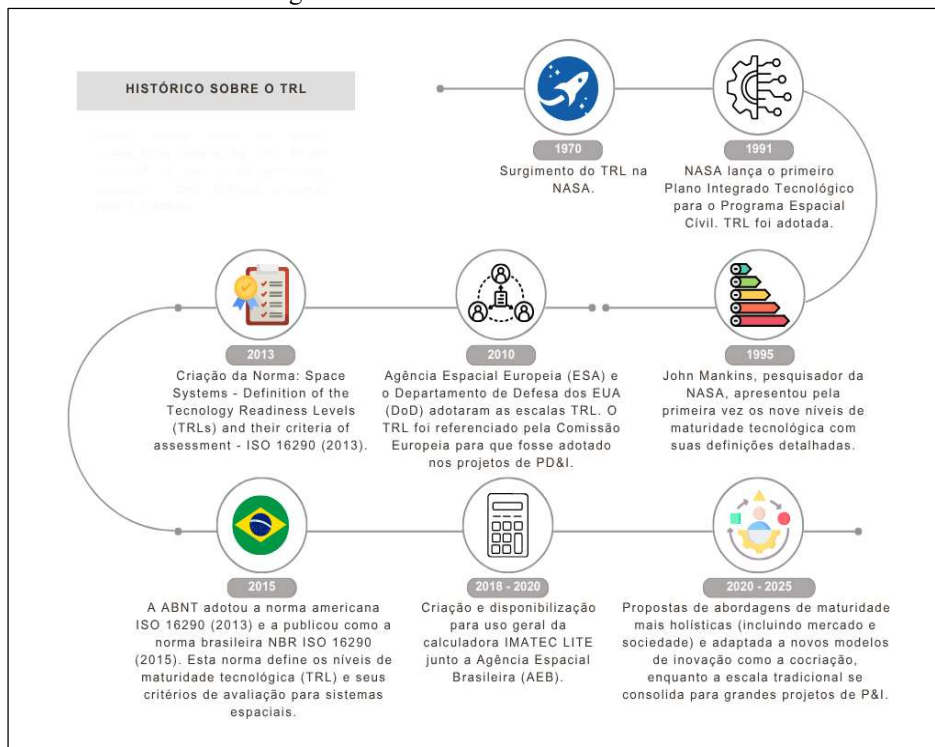
A aplicação dessa normatização pode ser exemplificada pelo projeto desenvolvido entre 2018 e 2020 por Xavier Junior *et al.* (2020), que criaram a calculadora IMATEC (*AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity*). A ferramenta, feita em parceria com a Agência Espacial Brasileira (AEB), foi desenvolvida tendo como base justamente os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 16290, demonstrando a consolidação do TRL como instrumento de gestão tecnológica.

Apesar de sua ampla disseminação e padronização, a metodologia TRL não esteve isenta de debates e críticas. A *European Association of Research and Technology Organisations* (EARTO) aponta que a transição entre os níveis nem sempre é claramente definida, podendo variar consideravelmente entre setores. Além disso, a mesma organização destaca que a progressão não é necessariamente unidirecional, pois tecnologias em estágios avançados podem demandar pesquisas adicionais, resultando em um recuo temporário na escala de maturidade (EARTO, 2014).

Atualmente, aprofunda-se essas críticas, questionando a própria concepção linear e puramente técnica do TRL. Vik *et al.* (2021) argumentaram que a maturidade tecnológica é um fenômeno multidimensional e propuseram, como alternativa, a metodologia *Balanced Readiness Level Assessment* (BRLA). Essa abordagem expande a análise tradicional ao incorporar outras quatro dimensões cruciais: *Market Readiness Level* (MRL), *Regulatory Readiness Level* (RRL), *Acceptance Readiness Level* (ARL) e *Organizational Readiness Level* (ORL), buscando oferecer uma avaliação mais completa e balanceada do real estágio de uma inovação (Vik *et al.*, 2021).

A Figura 1 foi elaborada para apresentar um resumo visual deste breve histórico, consolidando os principais marcos discutidos.

Figura 1 - Breve Histórico sobre o TRL



Fonte: Os autores (2025).

Indo além de uma proposta de expansão, a discussão conceitual chegou a questionar a filosofia por trás da escala. Yfanti e Sakkas (2024) criticaram o modelo TRL por refletir uma mentalidade de "inovação do produtor", considerada por eles inadequada para a contemporânea

"Era da Cocriação". Os autores identificaram que tecnologias frequentemente estagnam nos níveis TRL 6 ou 7 por não possuírem valor de mercado de forma isolada. Para solucionar essa lacuna, propuseram uma emenda direta à escada TRL, com a criação de um "caminho de cocriação" (com etapas de TRL 7C1 a 7C4), permitindo que inovações dependentes de um ecossistema colaborativo continuem sua jornada de maturidade (Yfanti; Sakkas, 2024).

Essa trajetória, da concepção na NASA à padronização, passando por críticas sobre sua rigidez e propostas de expansão e emenda, demonstra a vitalidade e a relevância contínua da metodologia TRL. O próximo tópico avança a discussão ao analisar os diferentes contextos de sua aplicação prática.

2.2 Contextualização da aplicação do TRL

Buscando contextualizar a utilização do TRL por meio de um marco teórico, uma revisão sistemática da literatura foi elaborada seguindo as diretrizes e etapas propostas por Page *et al.* (2021). Fez-se também uma análise bibliométrica e sistemática, que possibilitou mensurar os índices de produção e disseminação do conhecimento acerca do *Technology Readiness Levels*, de modo a acompanhar o desenvolvimento das pesquisas científicas e os padrões de autoria e publicação (Vanti, 2002; Lopes *et al.*, 2012). Para tanto, foram utilizadas as bases de conhecimento *Web of Science* (WoS) e *Scientific Periodicals Electronic Library* (SPELL), com o intuito de se efetuar o levantamento dos dados. Os descritores usados para a seleção dos estudos foram “*Technology Readiness Levels*” e “TRL”. O intervalo de pesquisa das publicações foi limitado aos anos de 2016 até 2025, de forma a evidenciar a atualidade das pesquisas, nos idiomas português e inglês. Destaca-se que na base WoS foram encontrados 388 estudos com acesso aberto, enquanto na SPELL, dois estudos estavam disponíveis para *download*, totalizando então 390 artigos para análise.

Ao empreender a pesquisa sobre o TRL e centrar esforços na análise da produção científica envolvendo essa temática, compreendeu-se que essa discussão tem grande potencial de exploração e que parte significativa dos estudos teóricos advém da literatura internacional e que no Brasil as pesquisas ainda são incipientes e carecem de análises mais profícuas e aprofundadas.

A difusão do TRL de sua concepção original na área aeroespacial para múltiplos setores, bem como as diversas alterações que a metodologia sofreu ao longo do tempo, são temas consolidados na literatura, conforme aponta a revisão sistemática de Li Hongwei *et al.* (2021). Foram selecionados para análise aprofundada os 10 trabalhos cujas abordagens estavam mais alinhadas ao objetivo desta pesquisa. A seleção se justifica por estes artigos tratarem de ferramentas para análise, um dos eixos que compõem a aplicação do nível de prontidão tecnológica ou do estudo do desenvolvimento de novas tecnologias tendo como base o TRL, de forma a se buscar as respostas para a questão de pesquisa estabelecida. O Quadro 2 apresenta os artigos selecionados.

Quadro 2. Artigos com relação direta à questão de pesquisa estabelecida

Artigos Selecionados	
1	GREENWOOD, Matthew <i>et al.</i> The Battery Component Readiness Level (BC-RL) framework: A technology-specific development framework. Journal of Power Sources Advances , v. 14, p. 100089, fev. 2022.
2	MAHAUDDIN, H. A. <i>et al.</i> Development and performance testing of a new in-pipe hydropower prototype towards Technology Readiness Level (TRL) 6. Cogent Engineering , v. 11, n. 1, p. 2319402, fev. 2024.
3	MEDINA-VALDES, J. L. <i>et al.</i> Study to Increase the TRL of Exoskeleton ERMIS Based on a Methodology to the Identification of Real Performance Parameters. Applied Sciences , v. 11, n. 9245, p. 1-16, out. 2021.
4	ROH, Kosan <i>et al.</i> Early-stage evaluation of emerging CO ₂ utilization technologies at low technology readiness levels. Green Chemistry , v. 22, p. 3842-3859, maio 2020.

Artigos Selecionados	
5	SOLIS, Martyna; SILVEIRA, Semida. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. Waste Management , v. 105, p. 128-138, fev. 2020.
6	STERNE, Michael <i>et al.</i> Import options for green hydrogen and derivatives - An overview of efficiencies and technology readiness levels. International Journal of Hydrogen Energy , v. 90, n. 1112-1127, p. 1112-1127, out. 2024.
7	SUZIANTI, Amalia <i>et al.</i> Technology readiness level assessment of lithium battery in Indonesia for national electric vehicle program. AIP Conference Proceedings , v. 2227, p. 040010, maio 2020.
8	VAN CAUWENBERGH, N. <i>et al.</i> Beyond TRL – Understanding institutional readiness for implementation of nature-based solutions. Environmental Science and Policy , v. 127, p. 293-302, nov. 2022.
9	VERMA, Aditi; ALLEN, Todd. A Sociotechnical Readiness Level Framework for the Development of Advanced Nuclear Technologies. Nuclear Technology , v. 210, n. 9, p. 1722-1739, set. 2024
10	YASSERI, Sirous F. A measure of subsea systems' readiness level. Underwater Technology , v. 33, n. 4, p. 215-228, 2016.

Fonte: Os autores (2025).

A análise de publicações mais recentes revela que, na prática, a aplicação da metodologia segue duas vertentes principais: a avaliação direta de tecnologias e o desenvolvimento de *frameworks* adaptados para superar as limitações do modelo original.

Na primeira vertente, diversos estudos utilizam o TRL como uma régua para medir e comparar o estágio de desenvolvimento de tecnologias em setores estratégicos. É o caso de Sterner *et al.* (2024), que utilizam o TRL para comparar opções de importação de hidrogênio verde; de Solis e Silveira (2020), que avaliam tecnologias de reciclagem química de plásticos; e de Suzianti *et al.* (2020), que medem a maturidade da tecnologia de baterias de lítio na Indonésia. Nesses casos, o TRL funciona como uma ferramenta de diagnóstico que apoia a tomada de decisão, como documentado em estudos de caso que acompanham o avanço de um protótipo ao longo da escala, como um sistema de hidrelétrica ou um exoesqueleto industrial.

A segunda vertente de aplicação surge do reconhecimento de que uma avaliação puramente técnica pode ser insuficiente. Pesquisadores têm proposto *frameworks* que expandem o TRL para contextos específicos. Verma e Allen (2024), por exemplo, desenvolvem um modelo sociotécnico para o setor nuclear, enquanto Van Cauwenbergh *et al.* (2022) propõem um *framework* de "prontidão institucional" para soluções baseadas na natureza, e Greenwood *et al.* (2022) criam uma versão mais granular, o BC-RL, para componentes de baterias.

Os trabalhos analisados demonstraram ser possível evidenciar a importância da utilização dessa metodologia para auxiliar e explicitar com eficiência o risco tecnológico presente em cada etapa do desenvolvimento. A aplicação do TRL, que antes se concentrava em projetos militares ou governamentais, hoje se mostra amplamente difundida em setores industriais estratégicos, como energia renovável (Sterner *et al.*, 2024; Mahauddin *et al.*, 2024), economia circular com a reciclagem de plásticos (Solis & Silveira, 2020) e o desenvolvimento de baterias para veículos elétricos (Suzianti *et al.*, 2020).

Também foi evidenciado o uso de ferramentas para a análise do nível de maturidade ou o desenvolvimento de novas metodologias que dela derivam. Os nove subníveis que compõem o TRL levam à definição de etapas que passam pela pesquisa básica da tecnologia, desenvolvimento tecnológico e desenvolvimento de sistemas e subsistemas. O nível de maturidade mais baixo, TRL-1, denota que os princípios básicos devem ser observados e reportados e, ao se atingir o nível de maturidade tecnológica 9, ou TRL-9, todos os sistemas estão testados, aprovados e prontos para lançamento.

Em síntese, seja aplicado de forma direta ou por meio de modelos expandidos, o TRL se consolidou como uma peça central na gestão da inovação. Sua utilização é fundamental para direcionar investimentos em P&D de forma mais eficaz, mitigar riscos e equilibrar o portfólio de projetos tecnológicos de uma organização.

2.3 Métodos de Avaliação do TRL e seus Desafios

A aplicação do TRL em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) depende diretamente da compreensão e do uso de métodos de avaliação adequados. O campo de estudo do TRL demonstra uma evolução conceitual contínua. Essa diversidade se manifesta na criação de escalas complementares, como o *Manufacturing Readiness Levels* (MRL), e, principalmente, na adaptação de ferramentas de cálculo para diferentes setores e abordagens teóricas, como demonstram os trabalhos de Rocha (2017) e Santos (2023). Portanto, a criação e o aprimoramento dessas ferramentas constituem, por si só, um campo de pesquisa ativo e relevante.

A origem dessas ferramentas de avaliação se deve aos esforços de padronização em ambientes de alta tecnologia, como o setor de defesa norte-americano. Nesse contexto, o trabalho de Nolte (2011) é um marco fundamental, pois resultou no *TRL Calculator* para o *Air Force Research Laboratory* (AFRL).

No cenário brasileiro, essa evolução é claramente visível na criação de ferramentas por diferentes instituições para atender a demandas específicas. Esforços de sistematização deram origem a calculadoras no contexto da indústria de defesa, como a do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) em parceria com o ITA, e a ferramentas oficiais para nortear políticas de fomento, disponibilizadas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e pelo Ministério da Educação (MEC). O MCTI, por meio da Portaria nº 6.449/2022, não apenas oficializou o uso de calculadoras de maturidade, como também disponibilizou seu próprio formulário eletrônico como ferramenta oficial para projetos fomentados pelo Ministério (Brasil, 2022).

Entre as ferramentas de destaque no Brasil está a plataforma online IMATEC (*AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity*), desenvolvida em parceria com a Agência Espacial Brasileira (AEB). Baseada nos critérios da norma ABNT NBR ISO 16290, a IMATEC representa um avanço em relação às planilhas estáticas ao oferecer uma estrutura analítica com consultas interativas e capacidade de exportação de relatórios, mostrando-se adequada para a utilização em projetos de P&D de base tecnológica e inovação, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Plataforma online IMATEC para avaliação de maturidade tecnológica.



Fonte: AEB (2020).

Apesar da proliferação de ferramentas, a implementação do TRL enfrenta desafios críticos. Olechowski *et al.* (2015) agrupam essas barreiras em três áreas principais: a complexidade dos

sistemas, que envolve questões de integração, interfaces e escopo; o planejamento e revisão, relacionado ao alinhamento com o ciclo de vida do produto e a confiança no processo; e a validade da própria avaliação, que toca na subjetividade e na imprecisão inerentes à escala. A superação desses desafios passa, portanto, pela contextualização e especialização da metodologia a cada projeto específico.

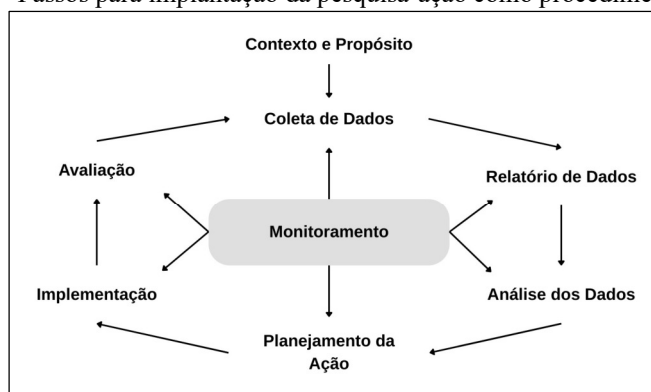
Em suma, mesmo com todos os desafios listados, a relevância do TRL é incontestável. A análise da literatura demonstra que sua aplicação sistemática, apoiada por um conjunto crescente e cada vez mais sofisticado de ferramentas de avaliação, traz benefícios diretos à gestão do risco tecnológico, que é inerente a todo processo de inovação e desenvolvimento de novos produtos.

3 METODOLOGIA

Visando gerar conhecimentos de aplicação prática na solução de um problema específico (Gil, 2019), esta pesquisa foi conduzida pelo método da pesquisa-ação. A escolha do método se justifica por seu caráter colaborativo (Thiollent, 2005). O objeto de estudo foi a Sense Eletrônica LTDA, empresa de base tecnológica na área de automação industrial, líder nacional em seu setor e com forte investimento em P&D, validada por incentivos fiscais como a Lei do Bem. Apesar da sua maturidade em gestão de projetos, utilizando, por exemplo, o guia PMBOK, a organização buscava formalizar a mensuração do risco e da maturidade tecnológica. Diante deste cenário, o projeto de desenvolvimento de um Sensor Ultrassônico Industrial foi selecionado como o campo de intervenção.

A operacionalização seguiu os ciclos de planejamento, ação e avaliação (Coughlan; Coughlan, 2002), detalhados na Figura 3. Para assegurar a credibilidade dos achados, critério fundamental em pesquisas qualitativas (Lincoln; Guba, 1985), empregou-se a triangulação de múltiplas fontes de dados: (i) análise de documentos técnicos do projeto; (ii) observação participante, com um dos pesquisadores atuando como engenheiro líder; e (iii) vinte entrevistas estruturadas com a equipe, guiadas pelo instrumento "Guia TRL-Sense" (Apêndice I).

Figura 3 – Passos para implantação da pesquisa-ação como procedimento técnico



Fonte: Adaptado de Coughlan e Coughlan (2002).

A análise de conteúdo dos dados foi um processo colaborativo, envolvendo um dos pesquisadores e os *stakeholders* da empresa. A intervenção ocorreu nos dois ciclos: no primeiro ciclo, utilizou-se a calculadora IMATEC para avaliar os subconjuntos “Transdutor Ultrassônico” e “Transformador”. No segundo ciclo, o processo foi refinado, aplicando-se a mesma calculadora em conjunto com o “Guia TRL-Sense” para reavaliar os componentes e analisar um novo, a “Placa de Circuito Impresso”. O monitoramento foi contínuo, realizado por meio de reuniões periódicas, entendendo que a oportunidade de aprendizagem e reflexão para

realimentar a ação é uma fase que permeia todos os ciclos (Ballantyne, 2004). Todo o processo específico deste estudo foi sistematizado em um fluxo metodológico, apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxo metodológico da pesquisa-ação adotada no estudo

	Fases da Pesquisa Ação		Objetivo	Stakeholders	Ferramenta	Seção no Trabalho
Planejamento da Pesquisa Ação	Pré-passo		Definir problema, stakeholders, delimitação da pesquisa e metodologia para solução do problema.	Pesquisador (Engenheiro Líder), Gerente de Marketing, Gerente de P&D e Gerente Industrial.		4.1
Ciclo 1	Coleta de Dados.	Análise dos Dados e Planejamento das Ações.	Determinar o nível de prontidão tecnológica para o subsistemas "Transdutor Ultrassônico" e "Transformador de Acoplamento Eletroacústico".	Pesquisador (Engenheiro Líder), Gerente de Marketing, Gerente de P&D e Gerente Industrial.	AEB IMATEC CALCULATOR	4.2
	Implementação da Ação.	Avaliação de Resultados.				
	Monitoramento.					
Ciclo 2	Coleta de Dados.	Análise dos Dados e Planejamento das Ações.	Determinar o nível de prontidão tecnológica para o sistema PCI e sua avaliação segundo critérios de EMC/EMI.	Pesquisador (Engenheiro Líder), Gerente de Marketing, Gerente de P&D e Gerente Industrial.	AEB IMATEC CALCULATOR	4.3
	Implementação da Ação.	Avaliação de Resultados.			Guia TRL-Sense	
	Monitoramento.					

Fonte: Os autores (2025).

Os dados e achados provenientes da aplicação da pesquisa-ação são detalhados e discutidos na seção seguinte.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fase de ação da pesquisa foi conduzida em dois ciclos iterativos, com o objetivo de implementar e avaliar a metodologia TRL no projeto de um Sensor Ultrassônico Industrial, um produto de alta complexidade e com tecnologias ainda não dominadas pela empresa.

4.1 Mapeamento e Preparação para a Análise TRL

A primeira etapa consistiu em alinhar a metodologia TRL com os processos de P&D já existentes na empresa. Foi definido que o "Sistema" (produto) seria o Sensor Ultrassônico, e a análise focaria no subsistema "Projeto Eletrônico". As "Montagens" (blocos tecnológicos) selecionadas para avaliação foram o Transdutor Ultrassônico (TU), o Transformador de Acoplamento Eletroacústico (TAE) e a Placa de Circuito Impresso (PCI).

Para operacionalizar a avaliação, foi crucial traduzir os nove níveis da escala TRL, conforme a norma ABNT NBR ISO 16290 (ABNT, 2015), para as etapas do ciclo de vida de desenvolvimento de produtos já consolidadas na empresa. Esse mapeamento, que guiou toda a coleta de dados, está sintetizado no Quadro 3.

Quadro 3 - Relação entre o TRL e as etapas do ciclo de vida do desenvolvimento do produto

Nível de prontidão tecnológica	Etapa do desenvolvimento de produto na empresa objeto do estudo	Questões para coleta de dados
TRL 1	Disponibilização dos dados de entrada e reunião de <i>Kick-Off</i>	(1.1) A fase cognitiva da criação foi concluída?
TRL 2	Idealização pré-protótipo	(2.1) A fase cognitiva da investigação científica (equacionamento de ideias) foi concluída?
TRL 3	Execução pré-protótipo	(3.1) Ensaios funcionais e simulações foram concluídos? (3.2) Medidas científicas orientadoras foram identificadas? (3.3) Uma prova de conceito de função crítica foi finalizada de forma analítica ou experimental?

Nível de prontidão tecnológica	Etapa do desenvolvimento de produto na empresa objeto do estudo	Questões para coleta de dados
TRL 4	Protótipo -Bancada	(4.1) Foi realizada investigação experimental em laboratório? (4.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho do componente foram derivados a partir de requisitos de medidas científicas? (4.3) Testes de laboratório mostraram que o modelo de desenvolvimento cumpre os parâmetros funcionais críticos e de desempenho?
TRL 5	Protótipo - LIT	(5.1) Foram realizadas investigações experimentais em ambiente relevante (espaço simulado)? (5.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho das componentes foram validados no ambiente relevante?
TRL 6	Protótipo – LIT testes completos	(6.1) O componente foi demonstrado em ambiente relevante (espaço simulado)?
TRL 7	Teste Cliente - Protótipo	(7.1) O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?
TRL 8	Teste Cliente - Piloto	(8.1) O componente foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional?
TRL 9	Validação	(9.1) O componente encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?

Fonte: Fonte: Os autores (2021).

4.2 Primeiro Ciclo de Ação: Diagnóstico Inicial da Maturidade

O primeiro ciclo, realizado em outubro de 2021, avaliou as montagens TU e TAE. Os resultados, obtidos via calculadora IMATEC e validados com os *stakeholders* (gerentes de P&D, industrial e engenheiro líder), são apresentados na Figura 5 e na Figura 6.

Figura 5 - Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica da Montagem TU (Ciclo 1)

Transdutor Ultrassônico	Avaliar	Nível: 5
Modelamento e Simulação	Avaliar	Nível: 8
Microesferas de Vidro	Avaliar	Nível: 5
Aglutinante e Resina	Avaliar	Nível: 8
Cristal Piezoelétrico Ressonante	Avaliar	Nível: 5
Condutores	Avaliar	Nível: 9

Fonte: Os autores por meio da IMATEC (2021).

A análise do TU revelou uma maturidade heterogênea entre seus componentes. Itens como "Modelamento e Simulação" atingiram TRL 8, indicando qualificação em ambiente operacional simulado. Em contrapartida, componentes críticos como "Microesferas de Vidro" e "Cristal Piezoelétrico Ressonante" alcançaram TRL 5, significando que, embora validados em ambiente de laboratório relevante (LIT), ainda demandavam evolução para testes em ambiente operacional. Já a montagem do TAE, por sua vez, demonstrou maturidade consolidada, com todos os seus componentes em TRL 9, indicando uma tecnologia já dominada e pronta para

produção. O alcance do TRL 5 em todos os componentes avaliados validou a passagem para a próxima etapa da pesquisa.

Figura 6 - Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica da Montagem TAE (Ciclo 1)

Transformador de Acoplamento Eletroacústico	Avaliar	Nível: 9
Modelamento e Simulação	Avaliar	Nível: 9
Fio de Cobre	Avaliar	Nível: 9
Clipe e Porta Ferrite	Avaliar	Nível: 9
Ferrite	Avaliar	Nível: 9

Fonte: Os autores por meio da IMATEC (2021).

4.3 Segundo Ciclo de Ação: Evolução da Maturidade e Análise da PCI

O segundo ciclo, conduzido quatro meses depois, em fevereiro de 2022, teve um duplo objetivo: reavaliar a evolução das montagens iniciais e analisar pela primeira vez a montagem "Projeto de PCI". Um dos resultados práticos desse ciclo foi a criação do "Guia TRL-Sense" (Apêndice I), uma ferramenta complementar desenvolvida para agilizar a aplicação da metodologia e mitigar riscos de indisponibilidade da plataforma IMATEC, que de fato ocorreu durante a pesquisa.

A reavaliação do TU, ilustrada na Figura 7, demonstrou um avanço significativo, com a montagem como um todo atingindo TRL 9. Este salto foi impulsionado pela qualificação de componentes-chave, como o Cristal Piezoelétrico, por meio da produção em escala com parceiros estratégicos.

Figura 7 - Reavaliação do Nível de Maturidade Tecnológica da Montagem TU (Ciclo 2)

Transdutor Ultrassônico	Avaliar	Nível: 9
Modelamento e Simulação	Avaliar	Nível: 9
Microesferas de Vidro	Avaliar	Nível: 9
Aglutinante e Resina	Avaliar	Nível: 9
Cristal Piezoelétrico Ressonante	Avaliar	Nível: 9
Condutores	Avaliar	Nível: 9

Fonte: Os autores por meio da IMATEC (2022).

O foco principal do segundo ciclo, a montagem "Projeto de PCI", conforme mostra a Figura 8, atingiu um TRL 5. Embora a montagem completa estivesse validada em ambiente de laboratório relevante (LIT), a análise revelou que a maioria de seus componentes internos (arranjos eletrônicos como Fontes, *Driver* e Microcontrolador) já se encontravam em TRL 8, qualificados em testes de campo. Esse resultado evidencia a complexidade da integração. A estratégia de desenvolvimento, que partiu de uma plataforma comercial (*evaluation board*) para uma arquitetura proprietária, e a validação em câmara anecoica segundo normas de EMC/EMI (ABNT NBR IEC/CISPR 11), foram fundamentais para mitigar os riscos tecnológicos desta etapa.

Figura 8 - Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica do Projeto de PCI (Ciclo 2)

Projeto PCI	Avaliar	Nível: 5
Fonte Chaveada de Potência	Avaliar	Nível: 8
Fonte 3V3	Avaliar	Nível: 8
Controlador Lógico / Microcontrolador	Avaliar	Nível: 8
Driver de Saída	Avaliar	Nível: 8
Módulo BLE	Avaliar	Nível: 5
IHM / HALL	Avaliar	Nível: 8

Fonte: Os autores por meio da IMATEC (2022).

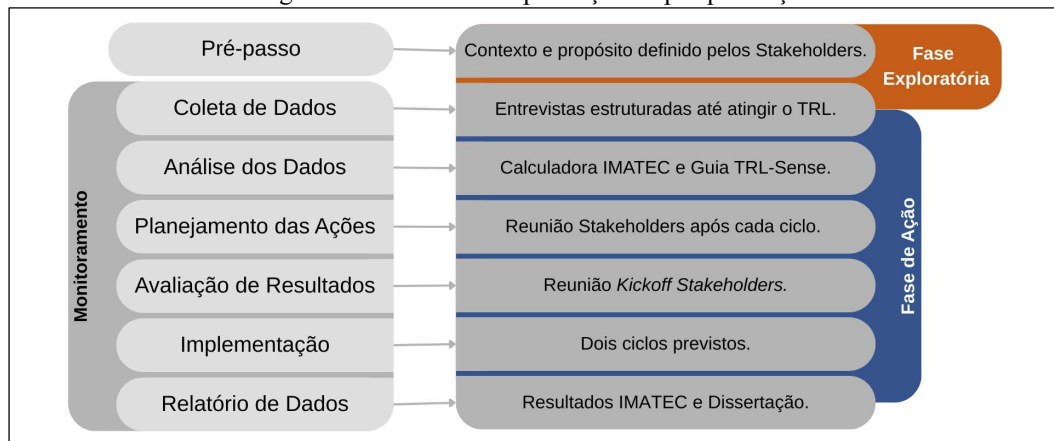
4.4 Discussão e Implicações para a Gestão de P&D

A aplicação do TRL permitiu identificar com clareza a maturidade tecnológica em diferentes estágios do projeto, validando sua utilidade como ferramenta diagnóstica. As percepções dos *stakeholders* ao final do processo foram consolidadas em três pontos principais: (a) o TRL é uma ferramenta eficaz para a mitigação de riscos tecnológicos; (b) em TRLs baixos, a metodologia permite redirecionar o desenvolvimento, enquanto em TRLs altos, guia o refinamento; e (c) a estrutura do TRL é simples e eficaz como ferramenta de gestão auxiliar.

Essas constatações empíricas encontram forte respaldo na literatura. As considerações (a) e (b) corroboram as pesquisas de El-Khoury e Kenley (2014) e Ribeiro (2019), que enfatizam o uso do TRL para a tomada de decisão em P&D. A simplicidade metodológica, ponto (c), é consistente com os achados de Lavoie e Daim (2017).

Como principal contribuição prática da pesquisa-ação, destaca-se o desenvolvimento do "Guia TRL-Sense", uma ferramenta gerencial adaptada que complementa a calculadora IMATEC e integra a avaliação de maturidade aos processos da empresa. Isso demonstra que, embora a metodologia TRL seja padronizada, sua implementação bem-sucedida se beneficia de ferramentas e processos customizados à realidade organizacional. A Figura 9 resume a estrutura completa da pesquisa-ação implementada.

Figura 9 - Resumo da implantação da pesquisa-ação



Fonte: Os autores (2025).

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa demonstrou que a implantação da metodologia *Technology Readiness Levels* (TRL) é uma estratégia viável e eficaz para avaliar e gerir a evolução da maturidade tecnológica em projetos de P&D, integrando-se aos processos de gestão existentes em uma empresa de base tecnológica, atendendo, dessa forma, aos objetivos estabelecidos. Ao tornar o risco tecnológico visível e mensurável, a metodologia se confirmou como uma ferramenta de gestão estratégica que aumenta o controle sobre o processo de inovação e fortalece a tomada de decisão.

Academicamente, o estudo contribuiu ao preencher uma lacuna na literatura, apresentando um caso detalhado de aplicação do TRL no setor industrial privado brasileiro, um contexto ainda pouco explorado, sendo os estudos anteriores predominantemente focados nos setores militar e governamental. Como principal contribuição gerencial e tecnológica, a pesquisa validou um modelo de integração do TRL aos processos de P&D e resultou no desenvolvimento do "Guia TRL-Sense". Esse guia funciona como uma ferramenta adaptável que exemplifica como a metodologia pode ser customizada para a realidade organizacional, servindo de referência para outras empresas que buscam maximizar a eficácia de seus investimentos em inovação.

Reconhece-se como limitações do estudo a inerente subjetividade na avaliação dos níveis de TRL, mitigada, mas não eliminada, pelo uso de questões estruturadas, e a implementação parcial da metodologia, dado que o projeto analisado já estava em andamento. Essas limitações, contudo, abrem uma clara agenda para pesquisas futuras. Sugere-se a condução de estudos longitudinais, que acompanhem um projeto desde o TRL 1 até o TRL 9, permitindo uma análise completa do ciclo de vida da inovação. Adicionalmente, estudos comparativos que apliquem o modelo em diferentes setores industriais são necessários para testar a generalização dos achados.

Em suma, os resultados reforçam o TRL não apenas como uma escala de medição, mas como uma peça fundamental na governança da inovação. Ao traduzir o avanço tecnológico em uma linguagem gerencial, a metodologia capacita as organizações a navegarem com maior segurança pelas incertezas do desenvolvimento de novas tecnologias, impulsionando sua capacidade competitiva de forma sustentável.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 16290:2015:** Sistemas espaciais — Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AEB - AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **IMATEC: Calculadora de Maturidade Tecnológica.** Brasília, DF: AEB, 2020. Disponível em: <https://imatec.aeb.gov.br/#/home>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Guia de Avaliação da Maturidade Tecnológica da ANEEL.** Brasília: ANEEL, 2024.

BALLANTYNE, D. Dialogue and its role in the development of relationship specific knowledge. **Journal of Business & Industrial Marketing**, v. 19, n. 2, p. 114-123, 2004.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Portaria nº 6.449, de 17 de outubro de 2022.** Institui a calculadora de maturidade tecnológica baseada no Technology Readiness Level (TRL). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 199, p. 31, 19 out. 2022.

CHAGAS DE MEDEIROS, A. B. C. O Desenvolvimento Tecnológico no Brasil: Desafios e Oportunidades que a Lei do Bem Gera para as Empresas. **Caderno Virtual**, v. 1, n. 58, 2024.

COUGHLAN, P.; COUGHLAN, D. Action research for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002.

DoD - DEPARTMENT OF DEFENSE (EUA). **Technology Readiness Assessment Guidebook.** Washington, D.C.: Office of the Under Secretary of Defense, 2023.

EARTO - EUROPEAN ASSOCIATION OF RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANISATIONS. **The TRL scale as a research & innovation policy tool, EARTO recommendations.** 2014. Disponível em: http://www.earto.eu/index.php?id=28&type=0&jumpurl=uploads%2Fmedia%2FThe_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

EMBRAPII - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL. **Manual de Operação dos Centros de Competência - PPI.** Brasília: EMBRAPPII, abr. 2024.

EMBRAPII - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL. **Manual de Operação EMBRAPPII.** Brasília: EMBRAPPII, set. 2020.

FAB - FORÇA AÉREA BRASILEIRA. **FAB realiza primeiro teste de voo do motor aeronáutico hipersônico 14-X.** Brasília, DF: FAB, 2022. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/38395/>. Acesso em: 28 mai. 2025.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.** 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GREENWOOD, M. *et al.* The Battery Component Readiness Level (BC-RL) framework: A technology-specific development framework. **Journal of Power Sources Advances**, v. 14, art. 100089, fev. 2022.

LINCOLN, Y.; GUBA, E. **Naturalistic inquiry.** Beverly Hills: Sage, 1985.

LOPES, P. F. *et al.* A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indicadores e ferramentas. In: CONGRESSO NACIONAL DE BIBLIOTECÁRIOS, ARQUIVISTAS E DOCUMENTALISTAS, 8., 2012, Lisboa. **Actas...** Lisboa, 2012. p. 1-7.

MAHAUDDIN, H. A. *et al.* Development and performance testing of a new in-pipe hydropower prototype towards Technology Readiness Level (TRL) 6. **Cogent Engineering**, v. 11, n. 1, art. 2319402, fev. 2024.

MANKINS, J. C. **Technology readiness levels: A white paper**. Washington, D.C.: Office of Space Access And Technology, NASA, 1995.

MEDINA-VALDES, J. L. *et al.* Study to Increase the TRL of Exoskeleton ERMIS Based on a Methodology to the Identification of Real Performance Parameters. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, art. 9245, out. 2021.

MEN, F. *et al.* Research on the Impact of Digital Transformation on the Product R&D Performance of Automobile Enterprises from the Perspective of the Innovation Ecosystem. **Sustainability**, v. 15, n. 7, p. 6265, abr. 2023.

NASA. **Systems Engineering Handbook**. Washington, D.C.: NASA, 2007. Disponível em: <http://www.acq.osd.mil/se/docs/NASA-SP-2007-6105-Rev-1-Final-31Dec2007.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2025.

NOLTE, W. **Readiness Level Proliferation**. AFRL/XPQ. Dtic. mil. EUA, 2011. Disponível em: https://ndia.dtic.mil/wp-content/uploads/2011/system/13132_NolteWednesday.pdf. Acesso em: 01 jun. 2025.

OLECHOWSKI, A. L. *et al.* Technology Readiness Levels at 40: A Study of State-of-the-Art Use, Challenges, and Opportunities (April 1, 2015). **MIT Sloan Research Paper** No. 5127-15, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2588524> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2588524>.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, 2021.

RIORDAN, J. *et al.* Interdisciplinary Methodology to Extend Technology Readiness Levels in ROCHA, D. *et al.* Uma adaptação da metodologia TRL. **Revista Gestão em Engenharia**, São José dos Campos, v. 4, p. 45-56, jun. 2017.

ROH, K. *et al.* Early-stage evaluation of emerging CO₂ utilization technologies at low technology readiness levels. **Green Chemistry**, v. 22, n. 22, p. 3842-3859, 2020.

SANTOS, W. B. M. **Adaptação e Implementação de Ferramenta para Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica no Segmento Alimentício, com Ênfase na Área de Pescado**. 2023. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023.

SOLIS, M.; SILVEIRA, S. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. **Waste Management**, v. 105, p. 128-138, fev. 2020.

STERNER, M. *et al.* Import options for green hydrogen and derivatives - An overview of efficiencies and technology readiness levels. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 90, p. 1112-1127, out. 2024.

SUZIANTI, A. *et al.* Technology readiness level assessment of lithium battery in Indonesia for national electric vehicle program. **AIP Conference Proceedings**, v. 2227, art. 040010, maio 2020.

THIOLLENT, M. **Metodologia da Pesquisa-ação**. 14. ed. São Paulo: Editora Cortez, 2005.

VAN CAUWENBERGH, N. *et al.* Beyond TRL – Understanding institutional readiness for implementation of nature-based solutions. **Environmental Science and Policy**, v. 127, p. 293-302, jan. 2022.

VANTI, N. A. P. Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. **Ciência da Informação**, v. 31, n. 2, p. 152-162, 2002.

VERMA, A.; ALLEN, T. A Sociotechnical Readiness Level Framework for the Development of Advanced Nuclear Technologies. **Nuclear Technology**, v. 210, n. 9, p. 1722-1739, set. 2024.

VIK, J. *et al.* Balanced readiness level assessment (BRLa): A tool for exploring new and emerging technologies. **Technological Forecasting & Social Change**, Amsterdam, v. 169, ago. 2021.

XAVIER JUNIOR, A. *et al.* AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity: Imatec. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 12, p. 1-17, 4 abr. 2020.

YASSERI, S. F. A measure of subsea systems' readiness level. **Underwater Technology**, v. 33, n. 4, p. 215-228, 2016.

YFANTI, S.; SAKKAS, N. Technology Readiness Levels (TRLs) in the Era of Co-Creation. **Applied System Innovation**, Basel, v. 7, n. 2, p. 1-13, abr. 2024.

APÊNDICE I – Produção Técnica Tecnológica GUIA TRL adaptado ao ciclo de vida de desenvolvimento de produto

Guia de aplicação TRL-Sense					
O objetivo desta produção técnica tecnológica é que esta ferramenta seja utilizada para auxílio do cômputo do TRL					
OBS: Reaplicar o guia para cada componente, montagem, subsistema e sistema e alimentar a ferramenta IMATEC					
Ferramenta no link:		http://imatec.aeb.gov.br/#/main			
Envolvidos:		SAB, RBR, AP.			
Data:		11/02/2022			
Previsão próxima avaliação:					
Projeto:		AD:	Versão: REV 0		
Subsistema:		Projeto Eletrônico			
Montagem:		Projeto PCI			
Componente:					
DOCUMENTO PRELIMINAR					
Nível de prontidão tecnológica	Etapa do desenvolvimento	Questões (todos devem responder)	Atingido?	Justificativa	Pendências
TRL 1	Disponibilização dos dados de entrada e reunião de <i>Kick-Off</i>	(1.1) A fase cognitiva da criação foi concluída?			
TRL 2	Idealização pré-prótipo	(2.1) A fase cognitiva da investigação científica (equacionamento de ideias) foi concluída?			
TRL 3	Execução pré-prótipo	(3.1) Ensaios funcionais e simulações foram concluídos? (3.2) Medidas científicas orientadoras foram identificadas? (3.3) Uma prova de conceito de função crítica foi finalizada de forma analítica ou experimental?			
TRL 4	Protótipo -Bancada	(4.1) Foi realizada investigação experimental em laboratório?			
		(4.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho da componente foi derivada a partir de requisitos de medidas científicas?			
		(4.3) Testes de laboratório mostraram que modelo de desenvolvimento cumprem os parâmetros funcionais críticos e de desempenho?			
TRL 5	Protótipo - LIT	(5.1) Foram realizadas investigações experimentais em ambiente relevante (espaço simulado)?			
		(5.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho das componentes foram validados no ambiente relevante?			
TRL 6	Protótipo – LIT testes completos	(6.1) O componente foi demonstrado em ambiente relevante (espaço simulado)?			
TRL 7	Teste Cliente - Protótipo	(7.1) O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?			
TRL 8	Teste Cliente - Piloto	(8.1) O componente foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional?			
TRL 9	Validação	(9.1) O componente encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?			