

Uma revisão e classificação das técnicas de avaliação de prontidão tecnológica baseadas na escala TRL

A review and classification of technology readiness assessment techniques based on TRL scale

Resumo: Os Níveis de Prontidão Tecnológica (TRL) surgiram no final da década de 1970, propostos pela Agência Espacial Americana (NASA). São nove níveis que buscam mensurar a maturidade de uma tecnologia ou produto. O processo que visa avaliar o nível TRL de uma tecnologia ou produto é denominado Avaliação de Prontidão Tecnológica (APT). No início dos anos 2000, a escala TRL passou a ser utilizada pela indústria e por governos ao redor do mundo, fazendo com que a APT crescesse de importância. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo investigar na literatura as abordagens existentes para a execução da APT baseada na escala TRL. Para tanto, foi conduzida uma revisão sistemática da literatura em bases de artigos científicos e repositórios de teses e dissertações. Fruto da revisão, foram identificados três grupos de abordagens: uma baseada em especialistas humanos, outra que utiliza calculadora em apoio ao especialista e, por fim, uma terceira que emprega ferramentas semiautomáticas ou automáticas, como indicadores bibliométricos e algoritmos de mineração de texto. O estudo possibilitou o levantamento de vantagens e desvantagens de cada uma dessas abordagens, além de lacunas ainda em aberto na literatura.

Palavras-chave: TRL; Nível de Prontidão tecnológica; TRA; Avaliação de Prontidão Tecnológica.

Abstract: The Technology Readiness Levels (TRL) emerged in the late 1970s, proposed by the National Aeronautics and Space Administration (NASA). There are nine levels that seek to measure the maturity of a technology or product. The process that aims to assess the TRL level of a technology or product is called Technology Readiness Assessment (TRA). In the early 2000s, the TRL scale began to be used by industry and governments around the world, leading to an increase in the importance of TRA. Given this scenario, this work aimed to investigate the existing approaches in the literature for the execution of TRA based on the TRL scale. For that, a systematic review of the literature was conducted on scientific article databases and thesis and dissertation repositories. As a result of the review, three groups of approaches were identified: one based on human experts, another that uses a calculator to support the expert, and, finally, a third that uses semi-automatic or automatic tools, such as bibliometric indicators and text mining algorithms. The study identified the advantages and disadvantages of each of these approaches, as well as gaps still open in the literature.

Keywords: TRL; Technology Readiness Levels; TRA; Technology Readiness Assessment.

José Luiz Neves Voltan 

Exército Brasileiro, Instituto Militar de Engenharia.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
voltan.jose@ime.eb.br

Rômulo Girardi 

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

Juraci Ferreira Galdino 

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

Ronaldo Ribeiro Goldschmidt 

Exército Brasileiro, Instituto Militar de Engenharia.
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
ronaldo.rgold@ime.eb.br

Recebido: 03 abr. 2023

Aprovado: 10 out. 2023

COLEÇÃO MEIRA MATTOS

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

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



1 INTRODUÇÃO

No final da década de 1970, Stan Sadin, funcionário da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), desenvolveu uma escala de níveis de prontidão tecnológica¹, do inglês *Technology Readiness Levels* (TRL). Com seis ou sete níveis, ela mensurava a maturidade de uma tecnologia e facilitava a comunicação entre os envolvidos no projeto, apesar de não definir detalhadamente cada nível (Mankins, 2009).

Com o passar dos anos, tornou-se latente a necessidade de adoção e padronização da escala pela NASA, principalmente após a perda do ônibus espacial Challenger, em 1986, o que provocou um processo de reestruturação das bases tecnológicas da agência (Mankins, 2009).

Em 1995, Mankins, também funcionário da NASA, publicou um documento (*White paper*) (Mankins, 1995) expandindo a escala TRL para nove níveis e melhorando a definição de cada um deles.

A partir dos anos 2000, a escala TRL passou a ser adotada por inúmeros órgãos, agências e empresas, dentre os quais o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (United States Department of Defense (USDOD)) e a Agência Espacial Europeia (European Space Agency (ESA)) (Mankins, 2009). Alguns adotam a escala definida pela NASA, fazendo pequenas modificações envolvendo a substituição de termos ligados ao meio espacial. Esse é o caso do Departamento de Segurança Interna dos Estados Unidos (EUA). Outros, como a Agência Espacial Europeia (Straub, 2015), criaram variações do TRL da NASA, descrevendo de forma mais detalhada cada um dos níveis.

No Brasil, diversas iniciativas levaram à adoção da escala TRL, por exemplo, a Agência Espacial Brasileira (Xavier *et al.*, 2020), o Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (Rocha, 2016) e o Departamento de Ciência e Tecnologia do Exército Brasileiro (Girardi; França Junior; Galdino, 2022).

Recentemente, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação brasileiro publicou a Portaria MCTI nº 6.449, de 17 de outubro de 2022, versando sobre a utilização do Sistema de Medição e Identificação do Nível de Maturidade Tecnológica no âmbito daquele ministério para contribuir com a seleção de projetos a serem financiados, bem como captar recursos não orçamentários, oferecendo critérios ágeis que permitam ao setor privado reconhecer oportunidades de investimento (Brasil, 2022).

A escala TRL permite mensurar o grau de confiabilidade de uma tecnologia, isto é, o quanto ela já foi testada e verificada, uma vez que identifica quais etapas ela já atende. Por exemplo, o TRL 9 atesta uma tecnologia operacional em um sistema demonstrada em operações reais. Já o TRL 4 garante que a tecnologia foi testada em ambiente laboratorial. Essa ideia de confiabilidade é muito importante no desenvolvimento de tecnologias críticas, como aquelas empregadas na área espacial (Mankins, 2009).

Apesar de ser amplamente empregada, uma dificuldade na utilização da escala TRL é determinar o nível de maturidade correspondente a uma determinada tecnologia. Esse processo recebe o nome de Avaliação de Prontidão Tecnológica² (APT) (Girardi; França Junior; Galdino, 2022).

1 Também é comum a tradução para a palavra maturidade.

2 Do inglês *Technology Readiness Assessment* (TRA).

Tradicionalmente, a APT busca avaliar o nível de maturidade de um produto ou tecnologia. Entretanto, é possível identificar na literatura o seu emprego na avaliação do desenvolvimento de uma tecnologia em sentido mais amplo, algo mais próximo da prospecção tecnológica³. Isso sugere o sucesso dessa ferramenta, na medida em que surgem novas aplicações.

A escassez de estudos abordando o estado da arte sobre as formas de realização da APT, particularmente no contexto de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), motivou este trabalho, cujo objetivo é identificar e analisar diferentes aplicações da APT baseada na escala TRL. Para tanto, foi conduzida uma revisão sistemática na literatura, na qual foram encontrados 180 artigos, a partir de cinco bases. Após a aplicação dos critérios de inclusão e expansão da busca, chegou-se a 18 artigos e uma dissertação relevantes no contexto analisado. Eles foram agrupados em três grupos, através de uma taxonomia proposta neste artigo.

Cabe aqui destacar que existem abordagens de APT que combinam a escala TRL com outras escalas, por exemplo, a *Manufacturing Readiness Levels* (MRL) (Wu *et al.*, 2017) e a *Commercial Readiness Level* (CRL) (Gerd Sri; Manotungvorapun, 2021). Essas abordagens não foram aqui contempladas, tendo em vista extrapolar o escopo deste trabalho, isto é, elas vão além do contexto de P&D. A MRL tem foco na avaliação da maturidade de manufatura, sendo especialmente útil para identificar os riscos e as lacunas no processo de transição entre tecnologia e fabricação (Wu *et al.*, 2017). Já a CRL analisa aspectos relacionados com a comercialização do produto e seu mercado consumidor (Gerd Sri; Manotungvorapun, 2021).

Assim sendo, o restante do artigo foi estruturado da seguinte forma: na seção 2, é apresentada a fundamentação teórica sobre a APT baseada na escala TRL. Na seção 3, são detalhados os aspectos metodológicos da revisão de literatura realizada. A seção 4 apresenta as abordagens existentes, classificadas por meio de uma taxonomia proposta no trabalho. Já a seção 5 traz uma discussão sobre a APT no contexto de cada uma das abordagens identificadas. Por fim, a última seção traz a conclusão do trabalho, apontando lacunas existentes na literatura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Atualmente, a NASA adota nove níveis de prontidão tecnológica. O nível 1 representa o mais básico, em que se observam princípios básicos, enquanto o nível 9, representa um sistema real que realizou operações bem-sucedidas. A Figura 1 ilustra esses níveis.

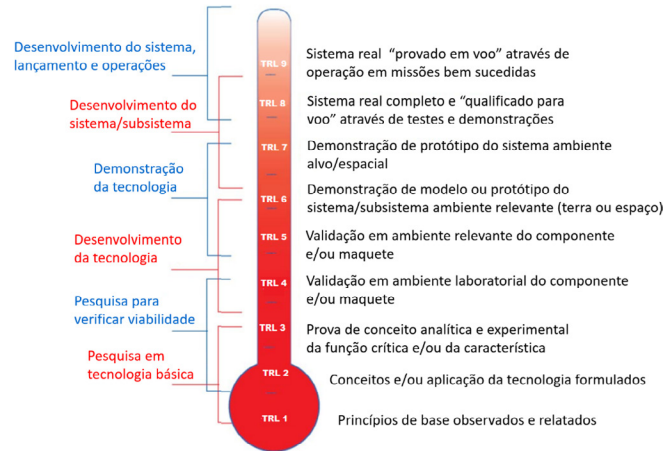
O NPR 7123.1C (National Aeronautics and Space Administration, 2020), publicado em 2020, apresenta a definição mais recente para os níveis de prontidão, particularizando-os para aplicações baseadas em software ou em hardware. Este documento possui precedência em relação a outras diretivas da NASA quanto às definições dos níveis de TRL. Isso é importante pois contribui para promover o entendimento comum sobre o assunto, tendo em vista as diversas propostas de modificações na definição dos níveis, que vêm sendo realizadas ao longo do tempo.

No Brasil, a norma ABNT NBR ISO 16290:2015 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015) trata sobre os sistemas espaciais, as definições e os critérios de avaliação dos níveis TRL.

³ Processo pelo qual pode-se chegar a um entendimento mais completo das forças que moldam o futuro a longo prazo e que devem ser levadas em consideração na formulação de políticas, planejamento e tomadas de decisão (Coates, 1985).

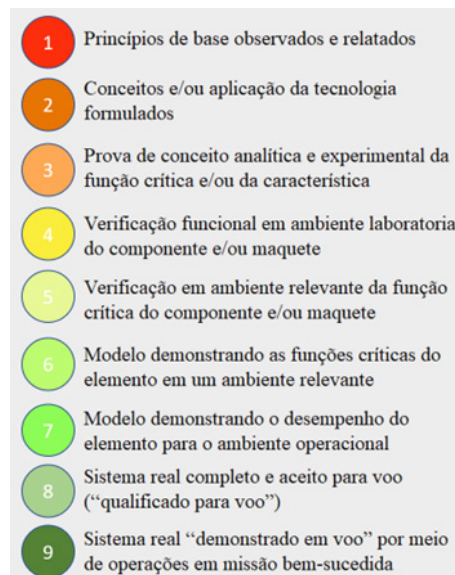
Tendo como referência a ISO 16290:2013, a norma ABNT NBR ISO 16290:2015 padroniza a definição de termos relevantes, contribuindo assim para promover o entendimento comum. Além disso, ela explica cada nível da escala, apresentando, inclusive, exemplos de enquadramento nos níveis da escala e assevera que apesar desses níveis terem sido definidos para sistemas espaciais, eles podem ser utilizados em um contexto mais amplo. A Figura 2 consiste em uma adaptação resumida das definições de cada nível da escala TRL (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015).

Figura 1 – Níveis de prontidão tecnológica



Fonte: Adaptado de Hirshorn, Voss e Bromley (2017).

Figura 2 – Definições dos níveis da escala TRL



Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015).

De fato, a escala TRL passou a ser aplicada em contextos diversos do espacial, mediante adaptações da proposta original feita pela NASA, como na aviação, na defesa, no setor de medicamentos, na energia das ondas e na reciclagem de compósitos (White *et al.*, 2022). Essas adaptações ocorrem nas definições, nas quantidades e terminologias utilizadas na escala.

Um ponto interessante a ser observado é que quanto menor o nível de TRL, mais amplo é o espectro de possíveis aplicações da tecnologia. À medida que as pesquisas se desenvolvem, e novos níveis de maturidade são atingidos, as tecnologias se tornam mais específicas (White *et al.*, 2022).

Outro ponto indicado na literatura é que ao se realizar uma APT, conforme concebida originalmente, para os níveis mais altos da escala, considera-se o elemento inserido em um produto alvo. Assim, um mesmo elemento pode ter um TRL alto em um produto e baixo quando empregado em outro produto.

Nesse sentido, França Junior e Galdino (2022) discutem essa característica da classificação da maturidade tecnológica explorando o exemplo do programa de modernização dos meios blindados do Exército, particularmente da viatura cascavel. Foram avaliados alguns subsistemas e tecnologias automotivas existentes no mercado, passíveis de serem considerados no processo de modernização da aludida viatura por já estarem em operação em determinadas plataformas, portanto, com TRL máximo. Contudo, em que pesem testados e certificados, considerando os requisitos específicos desses produtos ou plataformas, quando avaliados no sentido do atendimento dos requisitos específicos da viatura cascavel; eles atingiam TRL intermediário de, no máximo, nível 6.

3 METODOLOGIA

Este trabalho realizou uma revisão na literatura com o objetivo de investigar as abordagens existentes para a execução da APT baseada na escala TRL. Para isso, foram selecionadas cinco bases de pesquisa relevantes para a temática, construída uma *string* de busca e aplicados critérios de inclusão. Complementarmente, a busca foi expandida através da técnica bola de neve e da sugestão de especialistas.

Para a procura dos artigos analisados neste *survey*, as seguintes bases foram consultadas: ACM Digital Library, IEEE, ScienceDirect, Scopus e SpringerLink. Com o intuito de delimitar o escopo da pesquisa a trabalhos que utilizem análise textual de documentos na APT baseada na escala TRL, a *string* de busca consistiu na união dos termos “*Technology Readiness Levels*” (TRL), “*text mining*” e termos sinônimos para esta última expressão. Assim, a *string* de busca consistiu em: “*text mining*” OR “*text-mining*” OR “*data mining*” OR “*data-mining*” OR “*tech mining*” OR “*tech-mining*”) AND (“*technology readiness level*” OR “*trl*”). Foram feitas pequenas adaptações para cada uma das bases.

Cabe destacar que se optou por utilizar a sigla TRL, na *string* de busca, ao invés da TRA, pois alguns autores, apesar de realizarem uma avaliação de prontidão tecnológica, não utilizaram a sigla TRA nem a expressão *Technology Readiness Assessment* no título, resumo e palavras-chave. Mesmo nesses casos, a sigla TRL foi utilizada, pois esse é o principal emprego da escala.

Como critérios de inclusão, foram adotadas a escrita na língua portuguesa ou inglesa e a disponibilização integral do artigo. Além disso, a publicação deveria tratar sobre a APT ou

TRL. Sendo que os resultados desta última, foram utilizados na fundamentação teórica deste trabalho. A Tabela 1 traz a quantidade de publicações encontradas por base e a quantidade final após a aplicação dos critérios de inclusão mencionados acima. Na linha “Total”, considera-se a remoção de duplicatas, de tal maneira que artigos idênticos indexados simultaneamente por duas ou mais bases são contabilizados apenas uma vez.

Após essa pesquisa inicial, utilizou-se a técnica bola de neve (do termo em inglês *snowball*), com a finalidade de identificar artigos de interesse que citem ou que sejam citados pelos artigos selecionados. Também se buscou por outros artigos escritos pelos autores dos artigos selecionados. Foram encontrados oito artigos através dessa técnica, não contabilizados na Tabela 1, além de manuais, portarias e normas relevantes.

Tabela 1 – Resultado das consultas por base

Base	Artigos encontrados	Artigos mantidos
ACM Digital Library	1	0
IEEE	5	1
ScienceDirect	2	0
Scopus	15	2
SpringerLink	150	3
Total (<i>sem duplicatas</i>)	168	6

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Em especial, cabe destacar que a base SpringerLink apresentou muitos falso-positivos, pois a sigla TRL assume diferentes significados em áreas distintas. Por exemplo, na medicina, ela pode ser utilizada para se referir ao termo *Triglyceride-Rich Lipoproteins*. Na área de computação, refere-se às expressões *Traditional Reinforcement Learning*, ou ainda *Transfer Rule Learner*. Assim, apesar da grande quantidade de artigos encontrados nessa base, poucos foram mantidos após a aplicação dos critérios de inclusão.

Além da busca nas bases citadas, foram realizadas entrevistas com especialistas na área, buscando o levantamento de artigos, teses e/ou dissertações relevantes no contexto nacional, por meio das quais foram identificados os seguintes trabalhos: Rocha (2016); França Junior e Galdino (2019, 2022); Xavier *et al.* (2020); e Girardi, França Junior e Galdino (2022).

Assim, foram selecionados 18 artigos e uma dissertação, alguns com fortes bases teóricas sobre TRL e outros relacionados à APT. Durante a pesquisa não foram encontrados trabalhos do tipo *survey* similares a este trabalho.

Em relação aos trabalhos relacionados à APT e/ou identificação do nível de TRL de uma tecnologia ou produto, foram encontrados três conjuntos de abordagens: (1) utilização de equipe de especialistas; (2) utilização de ferramentas auxiliares em apoio ao especialista, por exemplo, calculadoras; e (3) utilização de ferramentas automatizadas.

A taxonomia aqui proposta permite agrupar as soluções pelo nível de automatização da APT. A solução, baseada em especialistas, remete a uma avaliação puramente humana. A utilização de ferramentas auxiliares (calculadoras) mescla habilidades de especialistas com software.

Por fim, as ferramentas automatizadas fazem parte de um processo parcialmente automatizado, isto é, o processo contempla uma fase de identificação e coleta de documentos, geralmente manual, seguida por uma análise quantitativa ou qualitativa automatizada.

Em relação à APT, também foi possível observar que, enquanto alguns autores analisam o TRL de uma tecnologia ou produto específico (sentido *stricto*), outros, fizeram essa avaliação de forma mais ampla, buscando identificar o cenário geral daquela tecnologia (sentido *lato*). Esse assunto é abordado na seção 5.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, os resultados serão apresentados e discutidos seguindo a categorização de soluções apresentada na seção 3, a saber: equipe de especialistas, ferramentas auxiliares e automatização.

4.1 Equipe de especialistas

Uma das formas mais elementares de se realizar uma APT é através de uma equipe de especialistas, na qual conta-se não apenas com profissionais com alto nível técnico na área da aplicação, mas também de pessoal habilitado na metodologia de avaliação da escala TRL (Britt *et al.*, 2008).

O especialista pode, por exemplo, estabelecer as funções críticas de desempenho, os ambientes de teste laboratorial e relevante, além de avaliar se os testes e procedimentos adotados para realizar o enquadramento na escala são bem-sucedidos. Existem diversos pontos subjetivos na avaliação que dependem da interpretação do especialista.

Essa abordagem remonta às origens do TRL e diversos trabalhos a utilizaram para avaliar tecnologias. Em Hrica *et al.* (2022), por exemplo, apresenta-se uma revisão das tecnologias voltadas para previsão e alerta de colisões envolvendo caminhões de transporte de mineração, a partir de uma escala de maturidade TRL adaptada para o domínio da mineração por Carr (2019). Na Figura 3, pode-se verificar a comparação entre as definições adotadas pela NASA, USDOD e por Carr (2019).

Nessa análise de maturidade tecnológica, os autores apontaram que a escala TRL fornece uma linguagem clara sobre o status da tecnologia, facilitando a comunicação. Além disso, a escala permite a identificação dos riscos associados à transição tecnológica⁴.

Nesse estudo, inicialmente, os autores realizaram a seleção dos documentos⁵ que serviram como subsídio para a classificação das tecnologias, utilizando três bases (Compendex, Scopus e OneMine). Com a remoção de duplicatas, obtiveram 432 artigos. Após aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, esse número foi reduzido para 64 artigos. Alguns artigos tratavam de mais de uma tecnologia. Assim, foram analisados 97 casos (Hrica *et al.*, 2022).

⁴ Refere-se ao processo em que uma tecnologia mais antiga e madura é substituída por outra mais recente e que oferece vantagem competitiva. Como exemplo, cita-se a transição do transistor para o circuito integrado (Weck, 2022).

⁵ Publicações científicas disponíveis publicamente, tais como artigos de periódicos revisados por pares, anais de conferências e relatórios governamentais.

Para atribuição do nível TRL de cada tecnologia tratada em cada artigo, a equipe se reunia por teleconferência, debatia informações importantes sobre cada publicação e, havendo um consenso de pelo menos três membros da equipe, chegava-se a uma classificação final (Hrica *et al.*, 2022). É importante observar que especialistas acessando as mesmas informações, em alguns casos, atribuíam níveis de maturidade distintos para uma mesma tecnologia.

Figura 3 – Comparação entre definições TRL NASA, USDOD e mineração

	NASA	USDOD	Mineração
1	Princípios de base observados e relatados	Princípios de base observados e relatados	Princípios de base observados e relatados
2	Conceitos e/ou aplicação da tecnologia formulados	Conceitos e/ou aplicação da tecnologia formulados	Conceitos e/ou aplicação da tecnologia formulados
3	Prova de conceito analítica e experimental da função crítica e/ou da característica	Prova de conceito analítica e experimental da função crítica e/ou da característica	Prova de conceitos estabelecida através de meios analíticos experimentais
4	Validação de componentes e/ou <i>breadboard</i> em ambiente laboratorial	Validação de componentes e/ou <i>breadboard</i> em ambiente laboratorial	Validação de componentes e/ou <i>breadboard</i> em ambiente laboratorial
5	Validação de componentes e/ou <i>breadboard</i> em ambiente relevante	Validação de componentes e/ou <i>breadboard</i> em ambiente relevante	Validação de componentes e/ou <i>breadboard</i> em ambiente relevante
6	Demonstração de modelo de sistema/subsistema em um ambiente relevante (terra ou espaço)	Demonstração de modelo de sistema/subsistema em um ambiente relevante	Demonstração de modelo de sistema/subsistema em um ambiente relevante
7	Demonstração do protótipo do sistema em um ambiente espacial	Demonstração do protótipo do sistema em um ambiente operacional	Demonstração do protótipo do sistema em um ambiente operacional representativo de mineração
8	Sistema real completo e aceito para voo ("qualificado para voo") através de teste e demonstração (terra ou espaço)	Sistema real completo e aceito através de teste e demonstração	Sistema real concluído e demonstrado através de testes de campo
9	Sistema real "demonstrado em voo" por meio de operações em missão bem-sucedida	Sistema real demonstrado através de missões operacionais bem-sucedidas	Sistema real demonstrado através do uso com sucesso em atividades de mineração bem-sucedidas sob uma gama de condições esperadas

Fonte: Adaptado de Carr (2019) *apud* Hrica *et al.* (2022).

Ao final do estudo, os autores encontraram poucas publicações que apresentavam tecnologias em níveis elevados (TRL > 6). Isso pode ter ocorrido pelo fato de terem sido considerados no estudo apenas publicações científicas revisadas por pares, as quais geralmente tratam de resultados aderentes aos níveis baixos e intermediários de TRL, não tendo sido consideradas publicações comerciais e *white papers* (Hrica *et al.*, 2022), as quais podem apresentar subsídios de iniciativas com TRL elevados.

Outro trabalho que adotou a metodologia do especialista foi Hardiyati *et al.* (2018). Os autores utilizaram periódicos indexados pelo Scopus e pelo Google Scholar, publicados até março de 2017. Um dos objetivos do trabalho era analisar o nível de maturidade tecnológica das publicações sobre biomedicina na Indonésia. Foram analisadas 1.258 publicações, das quais, apenas 546 incluíam P&D de novos medicamentos. Os autores utilizaram especialistas para a classificação dos artigos em uma nova escala adaptada para biomedicina⁶, conforme mostrado na Figura 4, e criaram um dicionário com as palavras-chave típicas de cada nível. Isso poderia ser utilizado em novas abordagens, inclusive visando automatização do processo de APT.

Figura 4 – Relação entre o TRL e a escala proposta

TRL 9	Ensaio clínico
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	
TRL 5	Pré-clínico (in vivo)
TRL 4	Pré-clínico (in vitro)
TRL 3	Descoberta de drogas
TRL 2	
TRL 1	Pesquisa básica

Fonte: Adaptado de Hardiyati *et al.* (2018).

Os autores concluíram que poucos estudos atingiram a última etapa de maturidade, gerando um produto para a indústria. Pontuam ainda que o processo de produção de novos medicamentos é longo e custoso (Hardiyati *et al.*, 2018).

De forma geral, essa abordagem tem a vantagem de contar com profissionais com capacidade de interpretar a documentação, inferir informações (o que não está explícito) e, por fim, chegar a uma conclusão baseada no seu conhecimento. Entretanto, possui a desvantagem da excessiva dependência da experiência e da qualificação técnica da equipe de especialistas, inserindo subjetividade no processo, induzindo problemas de comunicação, além de tornar o processo caro e lento (Britt *et al.*, 2008) (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018).

⁶ Modelo conceitual para classificação de pesquisas em biomedicina desenvolvida pelos autores. Eles apresentam a descrição de cada nível e a equivalência com o TRL (Hardiyati *et al.*, 2018).

4.2 Ferramentas auxiliares

Visando diminuir o possível viés do especialista, diversos trabalhos desenvolveram calculadoras TRL. Nesta abordagem, o especialista não precisa ter um conhecimento sobre a escala, bastando responder a uma série de perguntas. Ao final, a calculadora apresenta o nível TRL que melhor representa a tecnologia analisada.

A calculadora pode ter um grau de especificidade variável, na medida em que suas perguntas podem ser bem precisas e definidas ou serem mais genéricas, permitindo um emprego restrito a uma aplicação, ou mais amplo.

Dos trabalhos que utilizam essa abordagem, White *et al.* (2022) estudaram o emprego da escala TRL como forma de mensurar a maturidade de tecnologias voltadas para a detecção precoce de pragas e patógenos em árvores. Durante a pesquisa, realizaram entrevistas com especialistas e puderam observar a dificuldade em posicionar certas tecnologias na escala TRL. Assim, para auxiliar a APT de tecnologias ligadas ao meio ambiente, visando trazer maior objetividade, desenvolveram uma calculadora. Instituições como a NASA e o *Air Force Research Laboratory* também desenvolveram calculadoras como forma de apoio ao processo de avaliação do nível TRL de uma tecnologia ou produto (White *et al.*, 2022).

As calculadoras de TRL consistem em um conjunto de perguntas, geralmente implementadas por meio de softwares genéricos, como editores de planilhas, e que fornecem ao final do processo a maturidade da tecnologia analisada (White *et al.*, 2022), como a disponibilizada pela *New York State Energy Research and Development Authority* (NYSERDA)⁷, originalmente desenvolvida para a indústria de tecnologia limpa. Essa calculadora consiste em uma série de perguntas fechadas (resposta sim ou não), distribuídas em sete seções: resumo geral de prontidão tecnológica; mercado e necessidade do cliente; projeto e desenvolvimento; integração; teste e validação; meio ambiente e segurança; e, por fim, fabricação e ampliação (White *et al.*, 2022).

Inspirados nessa calculadora, White *et al.* (2022) desenvolveram uma nova, ilustrada na Figura 5, voltada para a área de biossegurança. Porém diferentemente daquela calculadora, cujas perguntas eram direcionadas para o contexto da engenharia e abordavam questões de fabricação, para a nova área havia a necessidade de adotar uma abordagem multiatores, com a inclusão dos *stakeholders* e usuários finais, pois as partes interessadas podiam apresentar diferentes interpretações sobre a maturidade da tecnologia, requerendo uma avaliação mais ampla (White *et al.*, 2022).

Além disso, alteraram a quantidade de seções, de sete para três, que passaram a ser: desenvolvimento de tecnologia; tecnologia e implantação; e desenvolvimento de negócios. Em outra modificação, perguntas que antes eram fechadas passaram a admitir respostas como “não conhecido” ou “não se aplica” (White *et al.*, 2022). O trabalho de White *et al.* (2022) não traz um exemplo de uso da calculadora, não aprofunda a metodologia (como se chega ao nível de maturidade a partir das respostas) e, também, não deixa claro como ela lida com os novos tipos de resposta “não conhecido” ou “não se aplica”.

Outra iniciativa de construção de uma calculadora TRL é apresentada em Girardi, França Junior e Galdino (2022). Os autores abordam a questão da customização do processo de

⁷ Disponível em: files.masscec.com/innovate-clean-energy/NYSERDA-TRL-Calculator.xlsm. Acesso em: 23 nov. 2023.

APT considerando uma perspectiva organizacional do Exército Brasileiro (Girardi; França Junior; Galdino, 2022).

Figura 5 – Tela da calculadora

TECHNOLOGY DEPLOYMENT AND COMMERCIALISATION		
3-1	Has a preliminary technology development plan to reach deployment been outlined?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-2	Have provisional arrangements been made for real-life testing?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-3	Have you identified any hazards associated with your technology?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-4	Have you undertaken an assessment to identify risks to end-users?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-5	Has the safety of the technology been assessed and confirmed?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-6	Has your technology been shown to be safe to use in the environment?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-7	Have test partners been identified?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-8	Has an aftercare strategy (maintenance, troubleshooting guide or failure analysis document, support plan) been developed?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-9	Have all safety documents been completed?	<input checked="" type="radio"/> YES <input type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA
3-10	Have all necessary end-user documents been developed and made available?	<input type="radio"/> YES <input checked="" type="radio"/> NO <input type="radio"/> NA

Please briefly explain the deployment of your technology

Instructions | Glossary | Summary | Development | Business Planning | **Technology Deployment** | Results

Fonte: White *et al.* (2022).

Em razão disso, foram acrescentados dois níveis de TRL em relação à escala tradicional. Até o nível 9, a escala proposta guarda grande semelhança com a tradicional. O nível 10 compreende a repetibilidade da produção, enquanto o 11 inclui o feedback do usuário do produto em operação (Girardi; França Junior; Galdino, 2022). A necessidade da construção dessa escala customizada para o Exército Brasileiro é apresentada em França Junior e Galdino (2019).

O processo de construção da calculadora é detalhado no trabalho e contou com 9 etapas: diagnóstico inicial, revisão bibliográfica, primeira minuta da calculadora, *workshop* com 22 especialistas de quatro grupos focais, versão 1 da calculadora, emprego experimental em casos reais⁸, consulta interna no âmbito institucional do Exército Brasileiro, versão 2 da calculadora e, por fim, a disponibilização da calculadora (Girardi; França Junior; Galdino, 2022).

A calculadora foi implementada em uma interface web, pela Agência de Gestão e Inovação Tecnológica (Agitec)⁹, e pode ser acessada por meio da rede corporativa do Exército Brasileiro. O especialista responde, no máximo, 11 perguntas para se obter a classificação TRL do objeto em análise. Para se obter uma classificação com poucas perguntas, adotou-se uma abordagem de resolver o problema de classificação do nível de TRL em duas etapas. Na primeira, é feita uma estimativa em uma das faixas de TRL, como ilustrado na Figura 6 (Girardi; França Junior; Galdino, 2022). Na segunda, são atribuídos indicadores para cada nível de TRL. Assim, após a resposta

8 Os programas foram: Diretriz Estratégica para a Formulação Conceitual dos Meios Blindados do Exército Brasileiro, Rádio Definido por Software e Míssil Solo – Solo 1.2.

9 Organização Militar do Exército Brasileiro.

à pergunta inicial, é feito um refinamento e confirmação com outras perguntas, considerando-se o mais alto nível em que os indicadores tenham sido atendidos (Girardi; França Junior; Galdino, 2022). A Figura 7 exibe a tela inicial da calculadora.

Xavier *et al.* (2020) abordam a relação existente entre a escala TRL e o gerenciamento de risco, sobretudo, a noção intuitiva de risco tecnológico e apontam a importância do desenvolvimento de uma calculadora. Segundo os autores, existem diversas calculadoras (arquivos XLS) distribuídas gratuitamente na rede mundial de computadores, porém, elas necessitam do programa MS Excel ou similar. Os autores apontam diversas desvantagens dessas calculadoras distribuídas em arquivos XLS ou similares, como problemas de segurança e suscetibilidade a erros humanos (Wirth 1976; Jackson, 2001 *apud* Xavier *et al.* 2020). Outro ponto negativo é a falta de uma estrutura de dados voltada para o armazenamento.

Figura 6 – Faixas da primeira etapa

TRL 11	Experimentação e feedback do usuário
TRL 10	
TRL 9	Integração, concepção e avaliação de protótipo
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Desenvolvimento e testes
TRL 5	
TRL 4	
TRL 3	
TRL 2	Estudos iniciais
TRL 1	

Fonte: elaborado pelos autores (2023), baseados em Girardi, França Junior e Galdino (2022).

Figura 7 – Tela da calculadora



Fonte: captura de tela da calculadora, disponível na página de intranet da Agitec.

Os autores do referido trabalho propõem uma calculadora voltada para o meio espacial. Apresentam uma metodologia em que, ao se avaliar a maturidade de um produto, utiliza-se a sua descrição analítica através de uma estrutura de divisão do produto, do inglês *Product Breakdown Structure* (PBS), em que os elementos do produto são desmembrados e detalhados, hierarquicamente, em subsistemas, montagens e componentes (Xavier *et al.*, 2020).

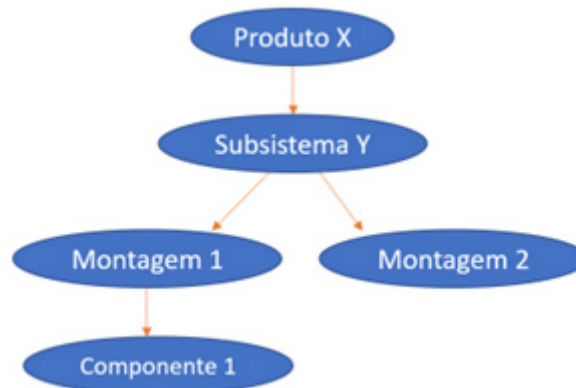
A Figura 8 exemplifica como esse conceito foi aplicado à calculadora. A Figura 9 traz a estrutura do exemplo da Figura 8 apresentada em uma estrutura de árvore. Nela, o Produto X possui o subsistema Y, este por sua vez possui a Montagem 1 e a Montagem 2. Por fim, a Montagem 1 possui o Componente 1.

Figura 8 – PBS aplicado à calculadora



Fonte: captura de tela obtida de: <https://imatec.aeb.gov.br/#/createProduct2>.

Figura 9 – Apresentação da PBS em estrutura de árvore



Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Segundo os autores, a maturidade de um produto é igual ou menor do que a maturidade dos elementos que o constituem (Xavier *et al.*, 2020). No exemplo da Figura 8, observa-se que se o Componente 1 recebeu nível 3, então a Montagem 1 poderia ter recebido um nível menor ou igual a 3. Se a Montagem 1 recebeu nível 2 e a Montagem 2 recebeu nível 6, o Subsistema Y poderia ter recebido um nível menor ou igual a 2.

A calculadora desenvolvida por esses autores recebeu o nome de IMATEC Lite, cuja letra I está associada à palavra índice e MATEC a maturidade tecnológica. A palavra *lite*, indica a intenção dos autores em expandi-la, abarcando um conjunto de ferramentas mais amplo envolvendo aspectos programáticos e de fabricação. Quanto ao uso da calculadora, o usuário inicialmente monta a estrutura do produto (PBS), a qual é armazenada em uma estrutura de dados, que pode ser exportada. Em seguida, responde a uma série de perguntas, criadas a partir da National Aeronautics and Space Administration (2014)¹⁰, que admitem como resposta sim ou não.

A calculadora utiliza uma lógica “se-então” (*if-else*) para orientar as perguntas com base nas respostas das anteriores. Isto é, quando todas as respostas para as perguntas de um determinado nível são afirmativas, então são exibidas as perguntas do nível imediatamente superior. O nível atingido corresponde ao maior nível que teve todas as respostas “sim” (Xavier *et al.*, 2020).

A calculadora não necessita de instalação e utiliza uma interface web disponível na rede mundial de computadores¹¹. Depois de responder as perguntas, o usuário recebe um relatório detalhado que lista não só o nível do produto final, como também dos elementos que o compõe. Quanto às tecnologias utilizadas, os autores relatam que as credenciais de login são armazenadas em um Banco de Dados MongoDB, a aplicação roda em nodeJS, os módulos em AngularJS, já a parte visual utilizou o *framework* Bootstrap CSS (Xavier *et al.*, 2020).

Os autores realizaram um estudo de caso envolvendo o sistema Serpens, acrônimo de Sistema Espacial para Realização de Pesquisa e Experimentos com Nanossatélites, que foi decomposto através da PBS utilizando 3 níveis. Depois disso, a equipe respondeu às perguntas e o sistema atingiu o nível 6 na escala TRL (IMATEC 6). Com esse resultado, os autores consideraram que o sistema Serpens teve as funções críticas de seus elementos verificadas e seu desempenho demonstrado em ambiente relevante (Xavier *et al.*, 2020).

Outro trabalho que desenvolveu uma calculadora TRL foi Rocha (2016). Nele, a autora aborda a necessidade de uma avaliação que considere além dos aspectos tecnológicos, outros como econômicos, documentais e político-legais. Essa inclusão visa considerar a realidade brasileira.

Rocha (2016) estabelece em sua metodologia TRL cinco etapas, a saber: decisão de aplicação, definição da equipe, identificação das tecnologias, recolha dos materiais e por fim a avaliação. Essa última pode ser subdividida em: demonstração da metodologia de avaliação TRL, dados da tecnologia a ser avaliada e a avaliação TRL.

A avaliação utiliza uma calculadora construída através do *software* Microsoft Excel, compreendendo 89 perguntas. Há questões baseadas em um *checklist* da NBR ISO 16290:2015, e outras com quesitos técnicos, econômicos, documentais e político-legais que admitem um percentual de realização. Outro diferencial da calculadora é que ela trabalha com um índice

10 Disponível em: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=7123&s=1B>. Acesso em: 6 dez. 2022.

11 Ver: <https://imatec.aeb.gov.br/#/home>.

de tolerância. Assim, diferente da NBR ISO 16290:2015, um nível TRL pode ser considerado atendido, mesmo sem que todos os requisitos tenham sido observados (Rocha, 2016).

Ao final do trabalho, a metodologia proposta foi aplicada em três tecnologias aeroespaciais: compósitos termoestruturais de carbono reforçado com fibras de carbono, motor L75 e o foguete VSB 30, e em uma tecnologia militar: a blindagem mista para aeronaves militares. A avaliação contou com técnicos, gestores das tecnologias analisadas e um facilitador responsável pelo preenchimento da calculadora. Por fim, Rocha (2016) fez uma análise comparativa entre os níveis alcançados através da metodologia proposta e o que seria obtido por meio de uma análise puramente baseada na NBR ISO 16290:2015, observando que em 75% dos casos, o TRL com ajuda da NBR ISO 16290:2015 foi maior do que o da calculadora TRL IAE/ITA-2016-1. Essa observação, na visão da autora, demonstra a subjetividade da mencionada norma.

Dessa forma, no que se refere à abordagem com ferramentas auxiliares, pode-se concluir que o uso de calculadoras simplifica o processo ao empregar uma série de perguntas padronizadas. O especialista da tecnologia não precisa conhecer a escala TRL. Além disso, cabe destacar que as perguntas podem ser formuladas no sentido de refletir as necessidades da organização. Entretanto, deve-se destacar que a superficialidade das perguntas pode induzir imprecisões na classificação.

A construção da calculadora pode ser realizada através de um processo elaborado, como o apresentado em Girardi, França Junior e Galdino (2022). Após isso, a realização da APT, utilizando-a, torna-se simplificada por não demandar especialistas na escala e por reduzir a subjetividade. Nesse mister, cita-se como caso de sucesso a calculadora TRL-EB, desenvolvida para o Exército Brasileiro, que já foi aplicada para cerca de 694¹² tecnologias e produtos de interesse da Defesa Nacional. O suporte ao seu uso conta apenas com analistas da Agitec para dirimir eventuais dúvidas específicas das equipes encarregadas da classificação da maturidade.

4.3 Automatização

Existem diversos métodos que buscam automatizar a obtenção do nível de maturidade tecnológica de uma tecnologia ou produto com base em publicações científicas, notícias e documentação de patente. Alguns são quantitativos, exploram a bibliometria e se baseiam no volume de documentos, os métodos desse grupo estão mais relacionados com a prospecção tecnológica.

Outros analisam os documentos com técnicas de mineração de texto e linguagem natural. Esse segundo grupo pode se aproximar do emprego tradicional da escala, quando os documentos se referem a uma tecnologia ou produto alvo bem determinados. Ou da prospecção tecnológica, quando a coleta se concentra em uma tecnologia em sentido amplo.

Lezama-Nicolás *et al.* (2018), inspirados por Watts e Porter (1997), construíram um método quantitativo que utiliza estimadores bibliométricos, em uma abordagem semiautomática, denominado *Bibliometric Method for Assessing Technological Maturity* (Bimatem). Eles estabelecem uma relação entre os estágios do ciclo de vida (Introdução, Crescimento e Maturidade),

12 Número de acessos até o momento (abril 2023) desde a disponibilização da ferramenta no âmbito do Exército Brasileiro (EB).

do inglês *Technology Life Cycle* (TLC)¹³, os tipos de fontes bibliométricas e os níveis da escala TRL, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Relacionamento TLC, fontes bibliométricas e TRL

TLC	Fontes bibliométricas	TRL
Introdução	-	1
	-	2
	Publicações científicas	3
	Publicações de engenharia	4
		5
Crescimento	Patentes	6
		7
Maturidade	Registro de notícias	8
		9

Fonte: Watts e Porter (1997) adaptado por Lezama-Nicolás *et al.* (2018).

O método consiste em definir a tecnologia a ser analisada, selecionar as bases de consulta, formular a *string* de busca e executar a consulta nas bases. Na etapa seguinte, faz-se a tabulação dos registros. Por fim, é realizada a avaliação matemática dos resultados recuperados e, finalmente, a atribuição do TRL (faixa) correspondente (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018). Para ilustrar a utilidade da Bimatem, os autores empregaram-na em um caso de estudo envolvendo tecnologias de manufatura aditiva.

Cabe destacar que o Bimatem considera que as tecnologias apresentam um caminho de inovação linear (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018), no qual as iniciativas avançam progredindo no nível de maturidade com o passar do tempo, na medida em que as atividades de P&D são realizadas. Entretanto, como comentam White *et al.* (2022), nem sempre é assim que o desenvolvimento tecnológico ocorre. Uma tecnologia que atingiu determinado TRL pode regredir para um TRL mais baixo, ao se verificar resultados inesperados em algum teste. Essa situação também pode ocorrer, inclusive com maior frequência, quando se modifica o objeto-alvo ao qual a tecnologia de interesse deve ser integrada. Esse caso foi ilustrado na seção 2, através do estudo de caso da viatura Cascavel trazido por França Junior e Galdino (2022), em que uma tecnologia madura, ao ser utilizada em um outro produto, regride a níveis de TRL mais baixos.

Faidi e Olechowski (2020) destacam a importância do TRL para a avaliação e planejamento durante o desenvolvimento de um produto ou tecnologia, destacam o papel dessa escala para a *design* de protótipos e consideram a automatização como a maneira de suplantar os principais problemas do emprego dessa escala: subjetividade e o alto custo de se empregar equipes de especialistas. Os autores analisam a coerência da relação entre o tipo de documento (e.g. notícias, patentes e artigos científicos) e o TRL (Faidi; Olechowski, 2020).

¹³ Os estágios do TLC são tecnologia emergente, em crescimento e madura. O estágio de declínio não é considerado por não se relacionar com a escala TRL (Lezama-Nicolás *et al.*, 2018).

Faidi e Olechowski (2020) apontam que trabalhos como o de Lezama-Nicolás *et al.* (2018) associam artigos científicos e de engenharia aos níveis mais baixos de TRL, patentes aos níveis intermediários e as notícias aos níveis mais maduros. Para refutar essa hipótese, os autores escolheram 15 tecnologias do setor de nanotecnologia com baixos TRL, baseando-se na classificação feita no documento *NASA Technology Roadmaps TA 10: Nanotechnology (2015)*¹⁴. Foram escolhidas e analisadas cinco tecnologias de cada um dos TRL 2, 3 e 4 (Faidi; Olechowski, 2020).

Os autores utilizaram três tipos de documentos (patentes, publicações científicas e notícias da indústria), restringiram a coleta ao período de 2009 a 2015 e, após análises, constataram que o mapeamento de tipos de publicação em níveis TRL não se verificava (Faidi; Olechowski, 2020).

Observaram, por exemplo, que tecnologias de TRL 3 obtiveram uma quantidade crescente de patentes ao longo do período analisado, como as folhas de grafeno que obtiveram mais de 50 patentes só em 2015. A ocorrência de patentes nesse nível de TRL baixo é algo que contraria considerações de parte da literatura, que associa patentes a níveis intermediários. Situação similar ocorreu ao se identificar registros de notícias para tecnologias desse mesmo TRL, que só seriam esperadas em TRL mais altos (Faidi; Olechowski, 2020).

Os autores supõem que a especificidade do nome da tecnologia e a natural utilização de nomes mais genéricos em níveis de desenvolvimento mais embrionários dificultam a busca pelos documentos relacionados com as tecnologias analisadas (Faidi; Olechowski, 2020).

Assim, em que pesem os métodos desse grupo, que empregam indicadores bibliométricos, terem a vantagem de automatizar parte do processo, ainda são muito dependentes da *string* de busca formulada nas consultas e das bases utilizadas. Outra crítica é que o desenvolvimento de tecnologias distintas pode não ter um comportamento uniforme, dificultando a busca por um padrão. Além disso, esse grupo de métodos está muito mais relacionado com a prospecção tecnológica do que com a avaliação de produtos ou tecnologias específicos, que possuem características díspares em termos de funções críticas de desempenho e especificações técnicas. O TRL não é um número absoluto, depende do contexto (França Junior; Galdino, 2022), nem sempre explícito ou identificável em documentos. Isso também pode se tornar um problema dessa abordagem, diante da necessidade de se flexibilizar alguns conceitos, como funções críticas de desempenho, induzindo subjetivamente no processo.

Outro grupo de métodos que visa automatizar o processo consiste em aplicar técnicas de mineração de texto. Nessa abordagem, podem-se aplicar, dentre outros tipos de modelos, aqueles oriundos da Inteligência Artificial (IA) voltados para a tarefa de classificação.

Dando continuidade aos estudos sobre a classificação de publicações científicas na Indonésia sobre biomedicina, Hardiyati *et al.* (2018) verificaram que modelos preditivos computadorizados baseados em mineração de texto proporcionam uma classificação eficaz e eficiente, principalmente quando se lida com um grande volume de documentos. Nesse sentido, os autores publicaram um trabalho empregando a abordagem de mineração de texto (Silalahi *et al.*, 2018).

O trabalho visou construir um modelo automatizado para classificar as publicações em um dos 4 níveis de maturidade propostos pela escala voltada para biomedicina (Figura 4), isto é,

¹⁴ Disponível em: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2015_nasa_technology_roadmaps_ta_10_nanotechnology_final.pdf.

pesquisa básica, descoberta de drogas, pré-clínico e ensaio clínico. Cabe destacar que os níveis pré-clínico *in vivo* e *in vitro* foram transformados em um único nível (Silalahi *et al.*, 2018).

Para isso, o trabalho analisou os algoritmos KNN, Naive Bayes e SVM. O conjunto de publicações contou com 539 artigos, distribuídos de forma não balanceada entre as classes. Sendo a classe pesquisa básica com o maior número de artigos (291), e ensaio clínico com o menor (9) (Silalahi *et al.*, 2018). Normalmente, modelos de IA que utilizam aprendizagem supervisionada, separam o conjunto de dados, no caso, publicações, em conjunto de treinamento e de teste. O primeiro visa ajustar parâmetros do modelo. O segundo, avaliá-lo.

A análise feita no referido trabalho restringiu-se ao resumo dos artigos. Inicialmente, foi realizado um pré-processamento com remoção de *stopwords*¹⁵ e aplicação de *stemming*¹⁶. Depois, aplicou-se um filtro nas palavras, baseado no *Term Frequency-Inverse Document Frequency* (TF-IDF)¹⁷ (Silalahi *et al.*, 2018).

Após o treinamento dos modelos, realizaram-se suas avaliações. Nessa etapa existem diversas métricas que buscam transmitir a ideia de assertividade do modelo, dentre elas a acurácia e o F1-score. A acurácia representa o total de acertos dividido pelo total de previsões, ou seja, quantas publicações foram classificadas corretamente em relação ao total de publicações do conjunto de teste. O F1-score é uma métrica de agregação baseada em outras métricas (precisão e revocação), e é comumente utilizada por indicar a qualidade geral do modelo.

Ao final, os autores concluíram que o modelo Naive Bayes apresentou os melhores resultados com acurácia de 80,46% e F1-score médio de 82,61% (Silalahi *et al.*, 2018).

Uma das possíveis aplicações do TRL apontadas na literatura é avaliar pesquisas em universidades. Com esse propósito, o governo da República da Indonésia utiliza o TRL através de uma variação, denominada *Tingkat Kesiaapterapan Teknologi* (TKT). O resultado é utilizado em programas de financiamento de pesquisas. Na metodologia adotada pelo Governo, funcionários aplicam, de forma manual, um questionário conhecido como *Teknometer* com o propósito de obter o TRL de pesquisas (Rintyarna; Sarno; Yuananda, 2018).

Três trabalhos propõem estender esse uso para a construção de um *ranking* universitário, baseado na avaliação da reputação acadêmica através da estimativa automatizada do TRL das publicações acadêmicas feitas por pessoas vinculadas às universidades. (Aliyanto; Sarno; Rintyarna, 2017; Rintyarna; Sarno; Yuananda, 2018; Rintyarna *et al.*, 2021). Tal associação é ilustrada na Figura 10.

A automatização proposta consiste em combinar uma expansão da taxonomia de Bloom com técnicas de mineração de texto, como uma alternativa para o processo de entrevistas manuais de especialistas, considerado custoso e demorado (Aliyanto; Sarno; Rintyarna, 2017).

Vários algoritmos de mineração de texto e de Inteligência Artificial foram utilizados nos resumos das publicações coletadas para apoiar a classificação do nível TRL, tais como: *Supervised Probabilistic Latent Semantic Analysis* (sPLSA) (Aliyanto; Sarno; Rintyarna, 2017);

15 *Stopwords* são palavras sem ou com pouco significado, como preposições e conjunções.

16 Consistem em remover prefixos e sufixos das palavras, deixando apenas seu radical.

17 É uma técnica de Processamento de Linguagem Natural que considera o número de ocorrências de uma palavra em um documento (*Term Frequency* - TF) e o inverso da quantidade de documentos que possuem essa palavra (*Inverse Document Frequency* - IDF) (Jurafsky; Martin, 2023).

LDA-Adaboost.MH (Rintyarna; Sarno; Yuananda, 2018) e *Labelled Latent Dirichlet allocation* (LLDA) (Rintyarna et al., 2021).

Figura 10 – Associação proposta



Fonte: Baseado em Aliyanto, Sarno e Rintyarna (2017); Rintyarna, Sarno e Yuananda (2018); Rintyarna *et al.* (2021).

Os trabalhos apresentaram variados graus de sucesso e utilizaram diferentes métricas ao comparar o ranking universitário obtido com o de referência (*QS World University Rankings*).

Tanto em Aliyanto, Sarno e Rintyarna (2017) como em Rintyarna, Sarno e Yuananda (2018) e Rintyarna *et al.* (2021), algumas etapas intermediárias do processo não foram detalhadas, como, por exemplo, o processo de treinamento dos modelos de classificação e a acurácia dos modelos no que se refere ao TRL. Isso pode ser explicado pelo fato de a obtenção do TRL ser um processo meio, e não o processo fim dos trabalhos.

Em síntese, a abordagem que utiliza mineração de texto tem como benefício tornar o processo de APT escalável, realizando diversas classificações em tempos significativamente inferiores ao processo manual. Nela, o modelo é capaz de classificar o nível TRL correspondente a uma tecnologia ou publicação pontual.

Como aspecto negativo, tem-se que a linguagem natural possui peculiaridades, tais como a ambiguidade e a vagueza, o que pode ser difícil para a construção de um modelo assertivo. Além disso, poucos trabalhos foram encontrados com essa abordagem, menos ainda foram os que detalhavam os procedimentos realizados.

Em que pese ser possível a utilização de algoritmos de IA e mineração de texto para analisar um conjunto de documentos de um produto alvo bem definido, não foram encontrados na literatura trabalhos que, de fato, os utilizassem.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após fornecer uma visão geral acerca das técnicas de APT identificadas na literatura voltadas para a área de P&D e que empregam a escala TRL, faz-se necessária a discussão de alguns pontos importantes identificados ao longo do estudo.

5.1 Enquadramento das técnicas de APT dentro de abordagens *stricto* e *lato*

Da análise dos trabalhos encontrados, pôde-se perceber algumas variações no que se refere ao emprego da escala TRL. A escala surgiu com o propósito de mensurar a maturidade tecnológica de uma tecnologia associada a um produto alvo, a partir de um conjunto bem definido de indicadores para cada nível, esta abordagem foi aqui denominada de análise estrita (*stricto*). Com a popularização da escala, outras possibilidades surgiram, como o uso em apoio às tarefas de prospecção e gestão tecnológica, relaxando alguns conceitos essenciais para a análise estrita. Essa categoria de trabalhos foi aqui classificada como sentido amplo (*lato*).

Na análise estrita (*stricto*) de emprego da escala mais tradicional pode-se citar o estudo de caso do sistema Serpens, proposto por Xavier *et al.* (2020). De fato, a calculadora proposta pelos autores permite ao usuário decompor o sistema em partes menores para fins de avaliação, chegando-se à mensuração objetiva do seu nível de maturidade. O sistema tem requisitos bem definidos, o que permite avaliar se um teste em um determinado ambiente foi bem-sucedido ou não.

Considerações similares também são válidas para os trabalhos de White *et al.* (2022), com a calculadora voltada para tecnologias de detecção precoce de pragas e patógenos em árvores; para Girardi, França Junior e Galdino (2022), com a calculadora voltada para produtos de defesa; e, também, para Rocha (2016) com a calculadora TRL IAE/ITA-2016-1. Dessa forma, verifica-se que a APT baseada no emprego de calculadoras é mais afeta à abordagem *stricto*, tendo em vista que há a definição clara dos indicadores que uma tecnologia precisa alcançar para viabilizar sua integração em um produto alvo específico.

Para o emprego da escala TRL em sentido amplo, alguns conceitos precisaram ser flexibilizados, por exemplo, o de função crítica de um elemento. Na definição original, a função crítica é específica de uma tecnologia em relação a um produto alvo. Quando aplicado em sentido *lato*, esse conceito torna-se mais genérico.

Como aplicação da ferramenta em sentido amplo, destaca-se o uso da escala TRL em apoio a atividades de prospecção tecnológica. Nesse sentido, podem-se citar os trabalhos de Lezama-Nicolás *et al.* (2018) e Faidi e Olechowski (2020), que abordaram a utilização de indicadores bibliométricos na definição dos níveis da escala.

Outra área em que a abordagem *lato* vem sendo empregada é em gestão da inovação ou gestão tecnológica. Nesse contexto, Faidi e Olechowski (2020) mostraram que grandes organizações de cunho tecnológico, como a NASA, vêm utilizando a escala TRL em apoio à construção de seus roteiros tecnológicos (*roadmaps*), enquanto Aliyanto, Sarno e Rintyarna (2017), Rintyarna, Sarno e Yuananda (2018) e Rintyarna *et al.* (2021) apresentaram a customização da escala de maturidade para a construção de *rankings* universitários. Esses exemplos indicam que as iniciativas relacionadas à automatização da APT, seja quantitativa (bibliometria) ou qualitativa (mineração de texto), ainda estão mais afetadas à abordagem *lato*, haja vista a complexidade da APT e a escassez de *datasets* que possuam um conjunto de documentos rotulados.

Em síntese, essas variações de uso da escala TRL estão relacionadas com a granularidade da análise. Na primeira (abordagem *stricto*), usa-se um “*zoom*” maior, permitindo identificar uma tecnologia específica associada a um produto alvo, com diversas características particulares, como os requisitos e as funções críticas de desempenho. Esse foi o propósito original concebido pela

NASA e exerce um papel fundamental no acompanhamento de P&D de produtos e sistemas de alta tecnologia. Na segunda variação (abordagem lato), reduz-se o “*zoom*”, trazendo uma visão mais geral, trabalhando com um agrupamento de produtos e tecnologias. Essa vertente tem disseminado o emprego da escala TRL em apoio a atividades de prospecção e gestão tecnológica.

Verifica-se que as abordagens têm propósitos distintos, apesar de utilizarem a escala de maturidade como referência.

5.2 Uso de patentes na APT

Conforme introduzido na seção 4.3, o uso de patentes na análise de maturidade é um tópico complexo e passível de contestação, como as críticas direcionadas por Faidi e Olechowski (2020) à metodologia Bimatem proposta por Lezama-Nicolás *et al.* (2018).

Essa complexidade se deve ao fato de as patentes de invenção serem utilizadas visando vários objetivos distintos, como os listados a seguir:

- Empresas buscam aumentar sua presença de mercado ao montar um portfólio com depósitos de patentes, mesmo que elas não representem grande avanço tecnológico e tenham baixo potencial de comercialização.
- Inventores individuais podem utilizar o depósito de patentes como artifício para enriquecer seus currículos. Um exemplo emblemático de que é possível depositar uma patente de algo claramente não patenteável é o caso do pesquisador Henry Jun Susuki. Ele, buscando provar essa hipótese, realizou, com sucesso, todos os procedimentos burocráticos necessários para iniciar o depósito de patente de um emoji (BR 102018004918-6 A2), mostrando que seria possível para um inventor contabilizar depósitos espúrios em seu portfólio (Suzuki, 2019).
- Alguns países, com baixos índices de depósitos, podem estabelecer políticas de incentivo à inovação, por meio do aumento do número de patentes de invenção. No Brasil, por exemplo, os depósitos de patentes de invenção passaram a ser considerados nas avaliações dos programas de pós-graduação a partir do quadriênio 2017-2020, fazendo com que vários programas aumentassem substancialmente esse indicador. Um exemplo desse movimento é o aumento de depósitos no âmbito da gestão de propriedade intelectual do Instituto Militar de Engenharia (IME). De acordo com dados obtidos na Intranet do IME¹⁸, na transição entre os quadriênios de avaliação 2013-2016 e 2017-2020, o depósito de patentes subiu de 2 para 21, representando um aumento de 950%.

Para que o uso de patentes na APT seja efetivo, deve-se considerar a força e o impacto de cada documento patentário, a partir de campos existentes nos bancos de dados associados. Uma patente é considerada forte e de impacto quando é negociada e/ou bastante citada. As negociadas têm grande possibilidade de serem utilizadas em produtos, implicando elevada maturidade. As muito citadas abrem rotas tecnológicas. Dessa forma, verifica-se que não basta realizar um trabalho meramente quantitativo, pois os depósitos de patentes de invenção podem indicar desde

18 <https://intraime.ime.br/propriedade-intelectual.html>

achados de baixa quanto de elevada maturidade, bem como podem ensejar impactos tecnológicos insignificantes, até aquelas que estabelecem novas rotas tecnológicas e que podem lastrear inovações disruptivas. Para se obter resultados mais assertivos com essa fonte de dados, é essencial complementar análises quantitativas com análises qualitativas.

Em síntese, há muitas questões em aberto para se utilizar patentes na APT. Uma direção possível, conforme introduzido no parágrafo anterior, seria o emprego de ferramentas automatizadas para explorar os campos existentes nos bancos de dados de patentes.

5.3 Vantagens e desvantagens das abordagens de APT

Além da diferenciação quanto ao emprego da escala TRL (seção 5.1), pode-se verificar algumas diferenças quanto à forma de avaliação da tecnologia/produto dentro das técnicas apresentadas. De forma a sintetizar todas as observações feitas ao longo da seção 4, apresenta-se a seguir o Quadro 2, que resume as principais vantagens e desvantagens de cada uma das abordagens de APT.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens das técnicas de APT apresentadas

		Vantagens	Desvantagens
Equipe de especialistas		- Análise mais profunda - Maior flexibilidade	- Maior subjetividade - Custo mais elevado - Processo mais lento
Ferramentas auxiliares (mais afeta à abordagem <i>stricto</i>)		- Possibilidade de inserir uma visão institucional nas perguntas - Maior padronização durante a análise	- Necessidade de especialistas na formulação das perguntas - Necessidade de especialistas para responder às perguntas
Automatização (mais afeta à abordagem <i>lato</i>)	Quantitativa (bibliometria)	- Mais rápida, uma vez que não analisa o conteúdo dos documentos - Menor custo	- Resultados ainda são alvos de contestação na literatura - Dificuldade em formular uma boa <i>string</i> de busca
	Qualitativa (mineração de texto)	Menor custo e rapidez	- Necessidade de documentos que retratem o real estado da tecnologia - Ainda pouco estudada na literatura - Escassez de bases públicas de documentos rotulados

Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Importante verificar que a revisão bibliográfica realizada neste trabalho, evidenciou que equipes de especialistas e calculadoras são mais utilizadas no contexto da abordagem clássica (sentido estrito). Ao passo que as técnicas de APT automatizadas vêm sendo empregadas no sentido amplo, usos mais recentes e com vasta gama de questões em aberto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escala TRL tornou-se importante em vasto rol de áreas e tem sido utilizada por diferentes segmentos – indústria, academia e governo – em muitos países. Ela permite uma melhor comunicação entre as equipes envolvidas com um projeto de P&D, além de um melhor acompanhamento em relação à evolução da maturidade e confiabilidade de uma tecnologia. Além de seu uso inicial, também tem sido utilizada como uma ferramenta na prospecção e gestão tecnológica, buscando estimar avanços tecnológicos.

Diante da escassez de estudos sobre o estado da arte das formas de realização da APT utilizando TRL, este artigo pretende contribuir com o preenchimento dessa lacuna, analisando diferentes trabalhos sobre essa temática.

Neste trabalho foram analisados 180 documentos, conjunto que foi reduzido ao se aplicar os critérios de inclusão. Ao final, no tocante à APT, foram identificadas três abordagens, os seus pontos positivos e negativos.

A primeira faz uso de uma equipe de especialistas, e utiliza o conhecimento dessas pessoas em relação à tecnologia e à escala TRL com a finalidade de realizar a classificação do nível de maturidade tecnológica.

Já a segunda combina especialistas com ferramentas auxiliares (calculadoras). Dessa forma, o especialista da aplicação tecnológica responde a uma série de perguntas em relação ao desenvolvimento da tecnologia. Essas perguntas, formuladas previamente, podem ser definidas ou estruturadas no sentido de incorporar a visão institucional no processo de avaliação.

Por fim, a terceira busca automatizar o processo, através da extração de informação de publicações relacionadas a uma tecnologia de interesse. Para isso, um modelo de inteligência artificial é treinado com base em exemplos previamente rotulados. Depois, apresentam-se novos exemplos ao modelo, para fins de classificação da maturidade.

Em relação às lacunas existentes, foi possível identificar na literatura a existência de poucos trabalhos voltados para a APT empregando a mineração de texto. Esse emprego poderia ser em apoio a uma calculadora, como forma de validação das informações prestadas, ou mesmo como um processo independente. À exceção de Hrica *et al.* (2022), não foram encontrados *datasets* públicos que possuam um conjunto de documentos rotulados, associando a tecnologia presente a um nível de TRL.

Ainda como lacunas identificadas no estudo, verificou-se que há questões em aberto relacionadas à utilização de patentes na APT. Uma direção sugerida foi o emprego de ferramentas automatizadas para explorar os campos existentes nos bancos de dados de patentes.

Além das lacunas apresentadas previamente, pretende-se considerar em trabalhos futuros a realização de análises de APT que combinem a escala TRL com outras escalas, como, por exemplo, a *Manufacturing Readiness Levels* (MRL) (Wu et al., 2017) e a *Commercial Readiness Level* (CRL) (Gerdsri; Manotungvorapun, 2021), extrapolando o rol de aplicações para além de atividades de P&D, foco deste texto.

Outro tema pouco explorado e que pode ensejar novas pesquisas é analisar como os Núcleos de Inovação Tecnológica (NIT) estão realizando APT para subsidiar os processos de P&D, acúmulo de capacidade tecnológica e priorização de desenvolvimento científico e tecnológico das ICT apoiadas.

REFERÊNCIAS

ALIYANTO, D.; SARNO, R.; RINTYARNA, B. S. Supervised Probabilistic Latent Semantic Analysis (sPLSA) for estimating Technology Readiness Level. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION & COMMUNICATION TECHNOLOGY AND SYSTEM*, 11., 2017, Surabaya. **Anais [...]**. Surabaya: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICTS.2017.8265650.

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.

BRASIL. Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações. **Portaria MCTI no 6.449, de 17 de outubro de 2022**. Brasília, DF: Ministério da Ciência Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mcti-n-6.449-de-17-de-outubro-de-2022-437609158>. Acesso em: 9 dez. 2022.

BRITT, B. L.; BERRY, M. W.; BROWNE, M.; MERRELL, M. A.; KOLPACK, J. Document classification techniques for automated technology readiness level analysis. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, [s. l.], v. 59, n. 4, p. 675-680, 2008.

CARR, J. L. **An investigation into the factors that govern success for new safety and health technologies in the mining industry and the efficacy of those factors to predict the likelihood of success for emerging technologies**. 2019. Tese (Doutorado) – The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 2019.

COATES, J. F. Foresight in federal government policy making. **Futures Research Quarterly**, Bethesda, v. 1, n. 2, p. 29-53, 1985.

FAIDI, S.; OLECHOWSKI, A. Identifying gaps in automating the assessment of Technology Readiness Levels. *In: PROCEEDINGS OF THE DESIGN SOCIETY: DESIGN CONFERENCE*, 2020, Cambridge. **Anais [...]**. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. p. 551-558.

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 das Ciências Militares**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 47, p. 155-176, 2019. DOI: 10.22491/cmm.a009.

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 F. (org.). Estudos de defesa: inovação, estratégia e desenvolvimento industrial*. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2022. p. 42–71.

GERDSRI, N.; MANOTUNGVORAPUN, N. Readiness assessment for IDE startups: A pathway toward sustainable growth. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 24, p. 13687, 2021. DOI: 10.3390/su132413687.

GIRARDI, R.; FRANÇA JUNIOR, J. A.; GALDINO, J. F. A customização de processos de avaliação de prontidão tecnológica baseados na escala TRL: desenvolvimento de uma metodologia para o Exército Brasileiro. **Coleção Meira Mattos: Revista das Ciências Militares**, v. 16, n. 57, 2022. DOI: 10.52781/cmm.a084.

HARDIYATI, R.; SILALAH, M.; AMELIA, M.; NADHIROH, I. M.; RAHMAIDA, R.; HANDAYANI, T. A Conceptual Model for Classification of Biomedicine Research. *In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE*, 2018, Bristol. **Anais** [...]. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2018. DOI: 10.1088/1755-1315/197/1/012006.

HIRSHORN, S. R.; VOSS, L. D.; BROMLEY, L. K. **NASA Systems Engineering Handbook No. HQ-E-DAA-TN38707**. Houston: Nasa, 2017.

HRICA, J. K.; BELLANCA, J. L.; BENBOURENANE, I.; CARR, J. L.; HOMER, J.; STABRYLA, K. M. A Rapid Review of Collision Avoidance and Warning Technologies for Mining Haul Trucks. **Mining, Metallurgy and Exploration**, New York, v. 39, n. 4, p. 1357-1389, 2022. DOI: 10.1007/s42461-022-00633-w.

JACKSON, Michael. **Problem frames: Analysing and structuring software development problems**. Boston: Addison-Wesley, 2001.

JURAFSKY, D.; MARTIN, J. H. **Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition**. 3. ed. Stanford: Stanford University Press, 2023.

LEZAMA-NICOLÁS, R.; RODRÍGUEZ-SALVADOR, M.; RÍO-BELVER, R.; BILDOSOLA, I. A bibliometric method for assessing technological maturity: the case of additive manufacturing. **Scientometrics**, New York, v. 117, n. 3, p. 1425-1452, 2018. DOI: 10.1007/s11192-018-2941-1.

MANKINS, J. C. **Technology Readiness Levels: a white paper**. Houston: Nasa, 1995.

MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: A retrospective. **Acta Astronautica**, Amsterdam, v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.058.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **NASA Systems Engineering Processes and Requirements (w/Change 2) – NPR 7123.1C**. Houston: Nasa, 2020. Disponível em: <https://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPR&c=7123&s=1B>. Acesso em: 6 dez. 2022.

RINTYARNA, B. S.; SARNO, R.; FITRIANTO, P.; SATYAJI, Y. Automatic Assessment of Technology Readiness Level Using LLDA-Helmholtz for Ranking University. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, Hoboken, v. 11, n. 6, p. 2416-2421, 2021. DOI: 10.18517/ijaseit.11.6.14525.

RINTYARNA, B. S.; SARNO, R.; YUANANDA, A. L. Automatic ranking system of university based on technology readiness level using LDA-Adaboost.MH. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY, 2018, Yogyakarta. Anais [...]. Yogyakarta: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. p. 495–499. DOI: 10.1109/ICOIACT.2018.8350706.

ROCHA, D. **Uma Adaptação Da Norma NBR ISO 16290: 2015 Aplicada Em Projetos Do Setor Aeroespacial**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016.

SILALAH, M.; HARDIYATI, R.; NADHIROH, I. M.; HANDAYANI, T.; AMELIA, M.; RAHMAIDA, R. A text classification on the downstream potential of biomedicine publications in Indonesia. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATIONS TECHNOLOGY, 2019, Yogyakarta. **Anais [...]**. Yogyakarta: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. p. 515-519. DOI: 10.1109/ICOIACT.2018.8350778.

STRAUB, J. In search of technology readiness level (TRL) 10. **Aerospace Science and Technology**, Amsterdam, v. 46, p. 312-320, 2015. DOI: 10.1016/j.ast.2015.07.007.

SUZUKI, H. J. Método educativo para demonstrar que quantidade de pedidos de patentes não é uma boa métrica de inovação. **NEITEC/EQ/UFRJ**, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.neitec.eq.ufrj.br/noticias/metodo-educativo-para-demonstrar-que-quantidade-de-pedidos-de-patentes-nao-e-uma-boa-metrica-de-inovacao/>. Acesso em: 26 mar. 2023.

WATTS, R. J.; PORTER, A. L. Innovation forecasting. **Technological Forecasting and Social Change**, Amsterdam, v. 56, n. 1, p. 25-47, 1997. DOI: 10.1016/S0040-1625(97)00050-4.

WECK, O. L. **Technology Roadmapping and Development: A Quantitative Approach to the Management of Technology**. Berlin: Springer Nature, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-88346-1.

WHITE, R.; MARZANO, M.; FESENKO, E.; INMAN, A.; JONES, G.; AGSTNER, B.; MUMFORD, R. Technology development for the early detection of plant pests: a framework for assessing Technology Readiness Levels (TRLs) in environmental science. **Journal of Plant Diseases and Protection**, New York, v. 129, p. 1249-1261, 2022. DOI: 10.1007/s41348-022-00599-3.

WIRTH, N. **Algorithms+Data Structures=Programs**. New Jersey: Prentice Hall, 1976.

WU, C.; WANG, B.; ZHANG, C.; WYSK, R. A.; CHEN, Yi-Wen. Bioprinting: an assessment based on manufacturing readiness levels. **Critical reviews in biotechnology**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 333-354, 2017. DOI: 10.3109/07388551.2016.1163321

XAVIER, A.; VELOSO, A.; SOUZA, J.; CÁS, P. K.; CAPPELLETTI, C. AEB online calculator for assessing technology maturity: IMATEC. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 12, n. 1, e1320, 2020. DOI: 10.5028/jatm.v12.1098.

