

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

GABRIELA FERNANDES VIEIRA

PROPOSTA DE UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DO TRL EM PROJETOS DE
PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO

Joinville

2021

GABRIELA FERNANDES VIEIRA

PROPOSTA DE UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DO TRL EM PROJETOS DE
PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia de Transportes e Logística do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr. Eng.

Joinville

2021

GABRIELA FERNANDES VIEIRA

PROPOSTA DE UM MODELO PARA AVALIAÇÃO DO TRL EM PROJETOS DE
PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 23 de setembro de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cristiano Vasconcelos Ferreira
Orientador
Presidente

Prof. Dr. Carlos Maurício Sacchelli
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Ana Luiza Araujo
Membro

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha mãe, Cidinha, por ser minha maior inspiração e por ter me ensinado os maiores valores da vida. Ao meu pai, Rodolfo, por trazer o lado sorridente e feliz da vida, por mover o mundo para me ver feliz. À minha irmã, Helena, minha melhor amiga, que, mesmo longe, me acolhe diariamente, agradeço por compartilhar a vida comigo e espero que eu possa sempre dar o meu melhor para lhe servir de exemplo. Ao restante dos meus familiares, cada um com sua fração de apoio e suporte, agradeço por serem tão cruciais para o alcance das minhas conquistas. Ao meu namorado, Gustavo, agradeço o companheirismo inesgotável ao longo de todos esses anos, por compartilhar os sonhos comigo.

Agradeço especialmente às minhas amigas de São José dos Campos. À Ana Carolina, obrigada por ter compartilhado a última década ao meu lado, por termos alcançado juntas tantas conquistas. À Karina Dias, agradeço por ser um exemplo para mim. À Maria Fernanda, por tornar os dias mais leves e divertidos, agradeço por compartilhar risadas comigo.

Aos meus amigos de Joinville, todos com parcela significativa em minhas conquistas, agradeço a motivação e ensinamentos ao longo dessa graduação. Agradeço em especial ao Leonardo Vinícius e à Amanda Feller, por terem compartilhado comigo incontáveis momentos.

Ao Diretório Acadêmico, meu primeiro desafio extracurricular, e aos membros que ao meu lado tocaram duas gestões. Também agradeço à ESATI e a equipe que atuou comigo, me proporcionando tanto conhecimento em liderança e trabalho em equipe.

Agradeço à Amoveri Group e aos meus líderes, por serem fontes de aprendizado e inspiração para este trabalho, e pela confiança depositada em mim.

À UFSC, instituição que me permitiu o ingresso no ensino superior e o acesso à educação pública, gratuita e de qualidade. Agradeço aos excelentes professores que tive e àqueles que me serviram de inspiração, em especial ao meu orientador, Cristiano Vasconcellos, por ter me acolhido no desenvolvimento desse trabalho, me proporcionando todo o suporte para a realização deste.

Por fim, agradeço a todos que foram presentes na minha trajetória acadêmica e que, de alguma forma, fizeram parte dessa etapa da minha história.

“Que nada nos limite, que nada nos defina, que nada nos sujeite. Que a liberdade seja nossa própria substância, já que viver é ser livre.”
(Simone de Beauvoir).

RESUMO

A competitividade nas organizações atuais é um importante fator quando se trata da motivação empresarial para novos negócios, e os investimentos em tecnologia e valorização da mão-de-obra qualificada são considerados diferenciais no fomento à pesquisa e desenvolvimento. A análise dos ciclos de vida da inovação e a determinação do TRL de tecnologias, são fatores essenciais na definição dos estágios do projeto e apoio à gestão de riscos. Nesse contexto, o conhecimento acerca dos ciclos da inovação se faz necessário para que se obtenha uma avaliação da possibilidade de introdução de tecnologias inovadoras nas organizações, o potencial de desenvolvimento dessa e a probabilidade de permanência no mercado, de forma a auxiliar a tomada de decisões e a gestão de riscos e financiamento de projetos. O objetivo do presente trabalho é propor um modelo para avaliação do TRL em projetos de PD&I. Sendo assim, apresenta-se, inicialmente, uma revisão bibliográfica e, posteriormente, é feita a proposição e avaliação do modelo proposto. Como resultado, tem-se disponível um modelo que permite às empresas avaliarem o TRL dos seus projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Palavras-chave: Pesquisa. Inovação. Desenvolvimento. Projetos. Maturidade tecnológica. TRL.

ABSTRACT

Competitiveness in organizations is an important factor when it comes to business motivation for new scope, and investments in technology and the enhancement of qualified labor are considered differentials in fostering research and development. The analysis of innovation life cycles and the determination of the technologies TRL are essential factors in the definition of the project stages and the support of risk management. In this context, knowledge about innovation cycles is necessary to obtain an assessment of the possibility of introducing innovative technologies in organizations, the potential for development and the probability of remaining in the market, in order to assist decision making, risk management and project financing. The objective of the present work is to propose a model for evaluating the TRL of RD&I projects. Therefore, initially, a bibliographic review is presented and, later, the proposal and evaluation of the proposed model is made. As the results, a model is available for companies to assess the TRL of their research, development and innovation projects.

Keywords: Research. Innovation. Development. Projects. Technology maturity. TRL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma da abordagem metodológica.....	15
Figura 2- Escala de níveis TRL em esquema de termômetro de mercúrio.....	18
Figura 3 – Correlação entre os TRL, a fase de desenvolvimento e suas escalas.....	21
Figura 4 - Cinco etapas para conduzir a TRA.	22
Figura 5 - Abordagem Bottom Up para avaliação de TRL.	23
Figura 6 - Elementos da abordagem Bottom Up por níveis.	24
Figura 7 - Sistemática do TRL do DOE.	26
Figura 8 - Definição de escala, fidelidade do sistema e ambiente para TRL.	26
Figura 9 - Tela de criação de produto da IMATEC Lite.	31
Figura 10 - Tela de avaliação de maturidade da IMATEC Lite.	32
Figura 11 - Método avaliativo ITA.	35
Figura 12 - Tela inicial da Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1.....	37
Figura 13 - Exemplo para a coluna "I" e "E" do TRL 1.....	40
Figura 14 - Tela de resultados da Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1.....	41
Figura 15 - Questionário da Calculadora de TRL do Clean Growth Hub.....	44
Figura 16 - Tela de dados do modelo.	49
Figura 17 - Dados da equipe.....	49
Figura 18 - Tela de definição de CTE.	51
Figura 19 - Bloco de perguntas para criticidade de elementos.....	51
Figura 20 - Bloco de perguntas para TRL 1.	53
Figura 21 - Bloco de perguntas para TRL 2.	54
Figura 22 - Bloco de perguntas para TRL 3.	54
Figura 23 - Bloco de perguntas para TRL 4.	55
Figura 24 - Bloco de perguntas para TRL 5.	55
Figura 25 - Bloco de perguntas para TRL 6.	55
Figura 26 - Bloco de perguntas para TRL 7 e 8.	56
Figura 27 - Bloco de perguntas para TRL 9.	56
Figura 28 - Tela de resultados do modelo.	57
Figura 29 - Avaliação 1.	58
Figura 30 - Resultado da avaliação 1.	59
Figura 31 - Resultado da avaliação 2.	60

Figura 32 - Avaliação da etapa de definição de CTE.	61
Figura 33 - Avaliação das perguntas referentes aos TRL 1, 2, 3 e 4.	62
Figura 34 - Avaliação das perguntas referentes aos TRL 5, 6, 7, 8 e 9.	62
Figura 35 - Avaliação do software utilizado para desenvolvimento do modelo.	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Níveis de TRL propostos pela NASA.....	19
Quadro 2 - Correlação de TRL e fase de desenvolvimento do projeto.	21
Quadro 3 - Requisitos para teste de TRL.	27
Quadro 4 - Avaliação para definição de CTE.....	28
Quadro 5 - Perguntas por nível de TRL da IMATEC Lite.....	33
Quadro 6 - Associação de grupos de TRL aos níveis.....	36
Quadro 7 - Questionário para avaliação TRL.....	37
Quadro 8 - Princípios orientadores.....	43
Quadro 9 - Perguntas para parâmetro avaliativo.	45
Quadro 10 - Considerações finais por modelo.	47
Quadro 11 - Perguntas do formulário avaliativo.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB - Agência Espacial Brasileira
AFRL - Air Force Research Laboratory
ASCII - American Standard Code for Information Interchange
CTDS - Clean Technology Data Strategy
CTE - Critical Technology Element
DCTA - Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
DoD - Department of Defense
DS – Data Structure
ESA - European Space Agency
GAO - U.S. Government Accountability Office
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IoT – Internet of Things
ISED - Innovation, Science and Economic Development Canada
MIT - Massachusetts Institute of Technology
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NRCan - Natural Resources Canada
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
PD&I - Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PEB - Programa Espacial Brasileiro
PNAE - Programa Nacional de Atividades Espaciais
SINDAE - Sistema Nacional de Desenvolvimento de Atividades Espaciais
StatCan – Statistics Canada
TRA - Technology Readiness Assessment
TRL - Technology Readiness Levels

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	14
1.2. RESULTADOS ESPERADOS	14
1.3. METODOLOGIA CIENTÍFICA	14
1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. MATURIDADE TECNOLÓGICA	17
2.2. TECHNOLOGY READINESS ASSESSMENT (TRA).....	22
2.3. MODELOS DE MEDIÇÃO DE TRL	25
2.3.1 Guia de TRA do Departamento de Energia dos Estados Unidos	25
2.3.2. Calculadora IMATEC da Agência Espacial Brasileira (AEB)	29
<i>2.3.2.1. O software IMATEC</i>	<i>30</i>
2.3.3. Calculadora de TRL do Instituto Tecnológico Aeronáutica (ITA)	34
<i>2.3.3.1. A ferramenta Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1</i>	<i>35</i>
2.3.4. Calculadora de TRL do Clean Growth Hub do Governo do Canadá	42
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
3. PROPOSIÇÃO DE MODELO	48
3.1. DADOS INICIAIS DO PROJETO	48
3.2. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS CRÍTICOS DE TECNOLOGIA.....	50
3.3. ETAPA DE AVALIAÇÃO DO TRL	52
3.3.1. Modelo	52
3.3.2. Resultado apresentado no modelo	57
4. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO MODELO	58
5. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A — QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO ..	68

1. INTRODUÇÃO

A competitividade nas organizações atuais é um importante fator quando se trata da motivação empresarial para novos negócios, ao mesmo tempo que pode ser caracterizada como um desafio diário e intrínseco ao desenvolvimento econômico do país. A concorrência, a inovação tecnológica e a busca por uma gestão otimizada, são fatores que alavancam a capacidade de disputa entre organizações que desejam incrementar ou aperfeiçoar seus processos ou produtos.

Os investimentos em tecnologia e valorização da mão-de-obra qualificada podem ser considerados como diferenciais competitivos no fomento à pesquisa e desenvolvimento no mercado, embora, esse ainda seja um assunto crescente no ambiente empresarial brasileiro. A análise dos ciclos de vida da inovação e a determinação dos níveis de maturidade tecnológica, são fatores essenciais no que tange à competitividade entre as organizações de base tecnológica, pois, o risco associado à inovação é pertinente à maturidade das tecnologias (QUINTELLA et al., 2019).

A classificação da maturidade de uma tecnologia, em diversos estágios, permite uma análise dos riscos aceitáveis oriundos dessa, também permitindo um entendimento comum entre a relação de custo/benefício de determinado investimento e o estado de desenvolvimento da tecnologia. O conhecimento acerca dos ciclos da inovação reflete em vantagens competitivas, como a melhor avaliação da possibilidade de introdução de tecnologias inovadoras no ramo empresarial do qual a organização faz parte, o potencial de desenvolvimento e a probabilidade de permanência no mercado, auxiliando a tomada de decisões relacionadas ao desenvolvimento de processos e produtos, servindo como forte instrumento de apoio para gestão de riscos e financiamento de projetos (QUINTELLA et al., 2019).

Em meados dos anos de 1970, profissionais da National Aeronautics and Space Administration (NASA) se reuniram para discutir e estimar um método para avaliação da maturidade das tecnologias durante a fase de aquisição de um programa. Dessa discussão, surgiram os Technology Readiness Levels (TRL). Segundo Tzinis (2021), “Cada projeto de tecnologia é avaliado em relação aos parâmetros de cada nível de tecnologia e, em seguida, é atribuído uma classificação TRL com base no andamento do projeto”. Hoje, a escala TRL é amplamente veiculada pelas mais diversas instituições de pesquisa, desenvolvimento e inovação, tendo importante papel no desenvolvimento industrial.

Os Níveis de Prontidão de Tecnologia (TRL – Technology Readiness Level) se dão por um sistema de métrica que auxilia na avaliação da maturidade de determinada tecnologia e quando comparada a diferentes tipos de tecnologia (MANKINS, 2004). O nível TRL é definido após um processo de avaliação denominado Technology Readiness Assessment (TRA), que leva em consideração o conceito, as necessidades e requisitos da tecnologia e o potencial inerente a essa (QUINTELLA et al., 2019). Tal avaliação está assaz relacionada ao desenvolvimento de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação no âmbito empresarial.

Tecnologias que se encontram em fase inicial têm grande complexidade de pesquisa e análise, além do alto investimento financeiro. Quando se trata do desenvolvimento de tecnologias inovadoras, também deve-se levar em consideração a análise de riscos potenciais do projeto, fazendo levantamento de qual a probabilidade de que esse produto ou serviço, não venha a ser lançado no mercado. Ainda que algumas tecnologias se mostrem promissoras, deve-se determinar qual o custo/benefício para comercialização e os riscos oriundos de cada etapa no desenvolvimento do projeto, de forma a evidenciar ameaças e oportunidades de negócios (QUINTELLA et al., 2019).

Quando se fala no gerenciamento e análise de risco, a avaliação da tecnologia deve ser feita repetidamente, até que os requisitos estejam com valores aceitáveis no que tange ao atendimento das necessidades predefinidas do projeto (GIL; ANDRADE; COSTA, 2014). O risco é inversamente proporcional à maturidade de uma tecnologia, ou seja, quanto menor o nível do TRL no qual essa se encontra, maior o risco do projeto. Isso se dá pelo fato de que existem diversas etapas a serem cumpridas para que a tecnologia alcance a fase de lançamento no mercado e a comercialização.

Outro aspecto para o qual a determinação do TRL de uma tecnologia contribui na tomada de decisão, é a definição da fonte de fomento propícia para o financiamento do próximo nível de maturidade (QUINTELLA et al., 2019). Atualmente, encontra-se uma predisposição das agências de fomento em utilizar o TRL para identificar o nível de maturidade tecnológica dos projetos de inovação submetidos aos editais de determinados instrumentos de investimento (ABGI BRASIL, 2021).

Um aspecto importante é que, embora exista uma escala TRL, o enquadramento ou avaliação do TRL de um projeto é complexo, visto que, na literatura, não existe um modelo ou ferramenta que seja amplamente divulgado e determinado como assertivo em todos os parâmetros referentes à maturidade tecnológica, seja em projetos de produtos, ou projetos voltados à área de manufatura, processos e sistemas IoT.

Nesse contexto, este trabalho apresenta um framework para medição do TRL, tendo como escopo o estudo e análise das características e estado da arte de tecnologias, e o desenvolvimento de um modelo para avaliação e definição de TRL com base no sistema de mensuração de maturidade de nove níveis de enquadramento.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo para avaliar o TRL de projetos de PD&I.

Com base nisto, são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Compreender as práticas para definição e uso de TRL por meio de pesquisa;
- Identificar modelos e ferramentas utilizados para medição e classificação do TRL de tecnologias em projetos de inovação;
- Propor um modelo para avaliação de TRL nos projetos de PD&I;

Avaliar o modelo proposto para aplicação prática em uma empresa do segmento de inovação e tecnologia.

1.2. RESULTADOS ESPERADOS

A escala TRL foi desenvolvida para auxiliar a tomada de decisão dos gestores voltados para projetos de inovação e na utilização de tecnologias no desenvolvimento de sistemas robustos (MANKINS, 1995 apud DE JESUS, 2019). A utilização da análise da maturidade tecnológica serve como uma ferramenta de gestão do risco, a qual pode ser dada como inerente à tecnologia em desenvolvimento (QUINTELLA et al., 2019).

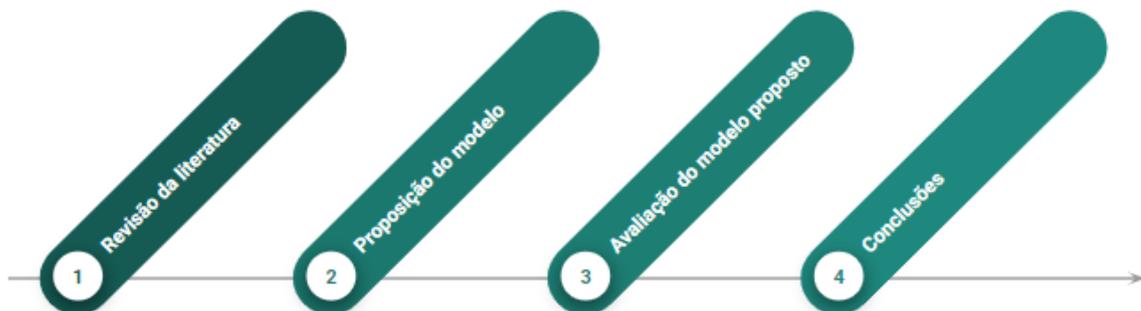
Nesse contexto, constitui-se como resultado esperado a proposição de um modelo geral que permita a avaliação do TRL de tecnologias, sendo esse capaz de adaptação conforme o tipo e área do projeto. Espera-se que o modelo proposto no presente trabalho possa vir a ser utilizado de forma a facilitar a tomada de decisão de gestores em projetos de PD&I.

1.3. METODOLOGIA CIENTÍFICA

A metodologia científica para realização do presente trabalho consistirá em quatro etapas. Com o objetivo de compreender o uso da escala TRL para definição da maturidade tecnológica de tecnologias e propor um modelo adaptável para diferentes segmentos de projetos

de PD&I, neste tópico serão detalhadas as metodologias utilizadas para o desenvolvimento de cada uma das etapas anteriormente mencionadas. A abordagem metodológica está descrita na Figura 1.

Figura 1- Fluxograma da abordagem metodológica.



Fonte: Autora (2021).

Para realização deste estudo, optou-se por avaliar diferentes ferramentas utilizadas para o cálculo de TRL de tecnologias a serem desenvolvidas.

Com o objetivo de compreender as práticas para definição e classificação da maturidade tecnológica em tecnologias a serem desenvolvidas em projetos de inovação, inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura, buscando entender o estado da arte.

Em suma, o objetivo dessa etapa é identificar os modelos de avaliação e classificação do TRL de tecnologias das áreas em estudo, de forma a entender quais critérios são levados em consideração, quais premissas e qual a aplicabilidade de cada um dos modelos, de forma a compor um banco de dados capaz de direcionar as informações necessárias para a medição de cada etapa.

Com base no banco de dados levantado por meio da revisão da literatura, nesta etapa foi feita a proposição do modelo com base nos estudos levantados, alinhando a compreensão dos modelos estudados previamente com os requisitos para elaboração de um novo modelo adaptável para diferentes áreas.

Para avaliação do modelo proposto, foi desenvolvido um formulário com as devidas questões a respeito da utilização e aplicação do modelo, assim, realizou-se uma pesquisa em uma empresa que atua na área de inovação aberta e governança corporativa. A ferramenta, desenvolvida em Excel, foi apresentada a dois membros da empresa em questão, especificando as instruções de uso e os objetivos macros que se teve ao propor a metodologia. Nesta etapa

foram abordados os resultados obtidos após a aplicação do questionário, logo, discorreu-se a respeito da usabilidade, da aplicabilidade e do detalhamento da configuração do modelo proposto.

1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente trabalho está organizado em capítulos.

No Capítulo 1, são apresentados a introdução sobre o tema, os objetivos gerais e específicos, os resultados esperados, a metodologia científica utilizada para o desenvolvimento e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, encontra-se a fundamentação teórica. São apresentadas as referências e conceitos ligados ao tema do trabalho, bem como a descrição de modelos exemplos utilizados na medição de TRL para cinco áreas distintas, sendo essas, saúde, eletrônica, software, metalmecânica e serviços.

No Capítulo 3, apresenta-se a proposição do modelo referente ao presente trabalho, sendo esse um modelo generalizado, que permita adaptação a depender da área de aplicação.

No Capítulo 4, é feita a avaliação do modelo proposto.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões deste trabalho e apontamentos para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abrange os conceitos e teorias acerca da escala TRL e sua aplicabilidade. Detalham-se, a seguir, a concepção do TRL, com suas características e descrições por níveis, bem como a importância da determinação do nível para a definição da melhor fonte de financiamento e fomento para o desenvolvimento de projetos.

Assim, serão identificados e especificados cinco modelos de medição de maturidade tecnológica aplicados à cinco diferentes áreas, que servirão de exemplo e apoio para a proposição do modelo objetivado com este estudo. Assim, serão mostrados os conceitos de materiais compósitos, de resina poliéster, da fibra de vidro, da laminação manual e do método utilizado para a realização dos ensaios.

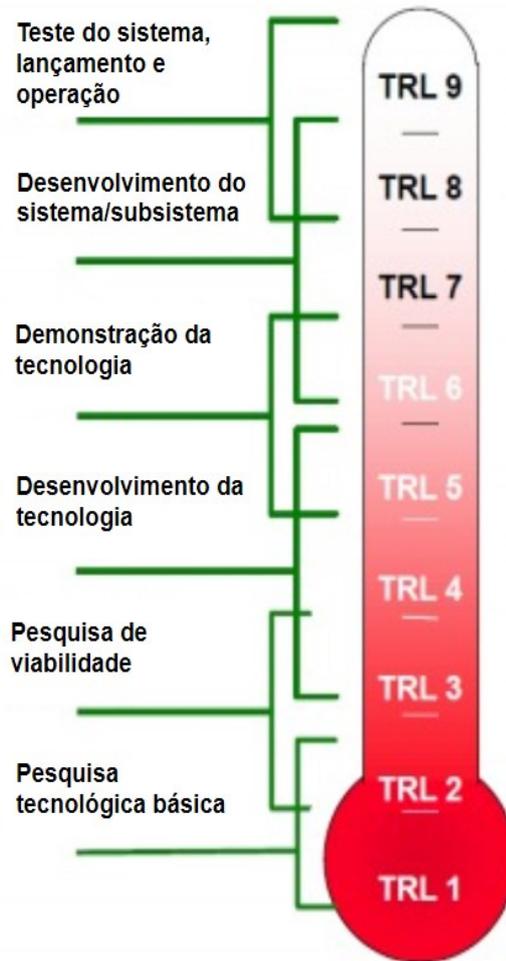
2.1. MATURIDADE TECNOLÓGICA

A escala de maturidade tecnológica Technology Readiness Level (TRL) foi elaborada visando obter uma medida relacionada ao estado de desenvolvimento de uma tecnologia em relação ao seu uso para sistemas aeroespaciais (SILVA NETO; TRABASSO, 2015), tornando-se, após, parte crucial na análise de riscos de projetos voltados a inovação tecnológica e no fornecimento de informações para auxílio na tomada de decisões de gestores.

A determinação da maturidade tecnológica é um importante processo de investigação para indústria e serve como uma ferramenta de gestão do risco inerente à tecnologia em desenvolvimento (QUINTELLA et al., 2019). Uma tecnologia é avaliada de forma que se divide o processo de desenvolvimento desta em níveis, os quais se referem aos níveis TRL, analisando-se o estado da arte, as necessidades e requisitos desta tecnologia, e o potencial para lançamento no mercado.

A escala foi inicialmente idealizada e elaborada por Stan Sadin, pesquisador da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em 1974. No ano de 1989, foi formalmente definida em sete níveis, e em 1995, a NASA adotou a atual definição desta com mais dois níveis, a qual conta, atualmente, com uma gradação de um a nove (QUINTELLA et al., 2019). A Figura 2, obtida e adaptada com base no documento publicado pela NASA, *Systems Engineering Handbook*, exemplifica a escala de TRL moldada conforme um esquema de termômetro de mercúrio, contendo uma breve descrição das atividades desenvolvidas por nível, estando essas, em alguns casos, associadas a mais de um nível simultaneamente.

Figura 2- Escala de níveis TRL em esquema de termômetro de mercúrio.



Fonte: Adaptada de NASA (2014, p. 296).

Atualmente, a escala tem sido amplamente utilizada em instituições e universidades como ferramenta de análise para tecnologia resultante de projetos e iniciações científicas. Assim, permite-se a definição se haverá proteção intelectual do seu ativo intangível, seja ele resultante de patente, marca, desenho industrial, topografia de circuitos integrados ou programa de computador, além da avaliação da inovação no que tange a sociedade (ALMEIDA, 2008).

Existem diferentes definições dos Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL) utilizados nas organizações, sendo a mais empregada delas a elaborada pela NASA (QUINTELLA et al., 2019). No que diz respeito ao uso dessa metodologia de aferição e avaliação em escala global, são considerados os níveis conforme o estado atual da tecnologia, ou seja, o estado da arte no qual ela se encontra, consistindo no nível mais alto de conhecimento a respeito da tecnologia em questão, analisando quais se enquadram conforme as descrições referentes aos níveis, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Níveis de TRL propostos pela NASA.

TRL	Característica	Descrição
1	Princípios básicos observados e reportados	Início da pesquisa científica a ser convertida para pesquisa aplicada e desenvolvimento. Exemplos incluem artigos sobre as propriedades básicas da tecnologia.
2	Conceito da tecnologia e/ou formulação da aplicação	Início da invenção. Uma vez que os princípios básicos são observados, pode-se dar início à invenção de aplicações práticas. Aplicações são especulativas, e pode não haver provas ou análises detalhadas para dar suporte às premissas. Exemplos são limitados a estudos analíticos.
3	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característica	Pesquisa ativa e desenvolvimento da tecnologia já iniciados. Aqui se incluem estudos analíticos e laboratoriais para validar fisicamente as premissas analíticas dos diferentes elementos que compõe a tecnologia. Exemplos incluem componentes que ainda não se encontram integrados.
4	Validação de componentes em ambiente laboratorial	Os componentes tecnológicos básicos são integrados para estabelecer o pleno funcionamento quando juntos. Tem-se aqui uma fidelidade relativamente baixa quando comparada ao eventual sistema. Exemplos incluem integração de hardware AD-HOC no laboratório.
5	Validação de componentes em ambiente relevante	A fidelidade quando comparada ao sistema real tem significativa melhoria. Os componentes básicos da tecnologia são integrados de forma razoavelmente realista, dando suporte aos elementos para teste em ambiente simulado. Exemplos incluem integração laboratorial dos componentes com alta fidelidade.
6	Modelo do sistema/subsistema ou demonstração do protótipo em ambiente relevante	Modelo representativo ou protótipo do sistema testado em ambiente relevante. Representa um grande passo na demonstração da prontidão da tecnologia. Exemplos incluem testar um protótipo em um ambiente laboratorial de alta fidelidade ou em ambiente de simulação operacional.
7	Demonstração do protótipo do sistema em ambiente operacional	Protótipo próximo ou no plano do sistema operacional. Representa um significativo passo quando comparado ao TRL 6 através de um protótipo de sistema real em um ambiente operacional.
8	Sistema real completo e qualificado através de teste e demonstração	Comprovou-se que a tecnologia funciona em sua forma final e sob as condições esperadas. Na maioria dos casos, esse TRL representa o fim do desenvolvimento do sistema verdadeiro. Exemplos incluem teste avaliação do sistema para determinar se está de acordo com as especificações de design.
9	Sistema real comprovado através de missões bem-sucedidas	Aplicação real da tecnologia em sua forma final e sob condições das missões. Exemplos incluem o uso da tecnologia em missões e operações.

Fonte: Adaptado de U.S. GAO (2020, p. 11).

De acordo com a ABGI Brasil (2021), para atender às particularidades das tecnologias em setores específicos, faz-se crucial um estudo da metodologia, as vezes exigindo adaptações

para aplicar a escala do TRL. Em suma, ao considerar o ciclo de vida de um projeto de inovação tecnológica, é necessário que haja o entendimento do fluxo de processos geral das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). O fluxo consiste na divisão do desenvolvimento do projeto por nível de conhecimento teórico e prático relativos a cada atividade executada. Essas atividades são:

- Pesquisa básica: atividade experimental ou teórica realizada com objetivo de obtenção de novos conhecimentos sobre os fundamentos de fenômenos e fatos observáveis, sem que haja qualquer aplicação dessa pesquisa ou uso em vista (Frascati, 2015 apud ABGI Brasil, 2021);
- Pesquisa aplicada: essa etapa pode se definir, segundo Frascati (2015, apud ABGI Brasil, 2021), como a investigação original realizada também com o objetivo de adquirir novos conhecimentos, porém, esta é destinada para um ponto específico e com viés de aplicação prática;
- Desenvolvimento experimental: trabalho metódico baseado no conhecimento obtido com a pesquisa anterior e capaz de gerar conhecimento adicional, sendo este direcionado para o desenvolvimento de novos produtos ou processos ou para aperfeiçoamento de produtos e processos existentes (Frascati, 2015 apud ABGI Brasil, 2021);
- Industrialização: desenvolvimento industrial da solução tecnológica de forma a correlacioná-la com as atividades de escalonamento, engenharia e ferramentaria (ABGI BRASIL, 2021);
- Produção e Comercialização: tecnologia em pleno funcionamento, validada e pronta para lançamento no mercado (ABGI BRASIL, 2021).

De acordo com o referencial de estudos disponibilizado pela ABGI Brasil (2021), ressalta-se que, apesar de subsequentes, não são todos os projetos de P&D que passam por todas as fases e atividades. Um exemplo se dá pelo desenvolvimento de projetos de aprimoramento de produtos e processos já existentes, onde, habitualmente, já existe conhecimento prévio acerca da tecnologia e descarta-se as etapas de Pesquisa Básica e Pesquisa Aplicada. Em casos como esse, inicia-se o projeto a partir da fase de Desenvolvimento Experimental.

Conforme a caracterização de cada atividade mencionada anteriormente, para cada nível de maturidade tecnológica, institui-se a correlação com as fases de desenvolvimento do projeto, conforme o Quadro 2 (ABGI BRASIL, 2021).

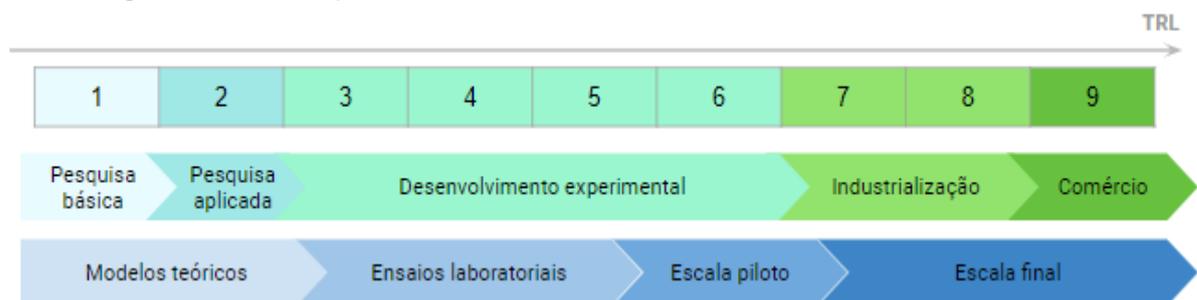
Quadro 2 - Correlação de TRL e fase de desenvolvimento do projeto.

TRL	Fase de desenvolvimento
1	Em fase de Pesquisa Básica, abrangendo estudos de novos fenômenos, novas propriedades da matéria, sem uma aplicação prática definida.
2	Geração de novos conhecimentos com enfoque em uma aplicação específica, como na Pesquisa Aplicada.
3 4 5 6	Transição da Pesquisa Aplicada para o Desenvolvimento Experimental. Neste nível, com base no conhecimento obtido nas etapas prévias, inicia-se um trabalho de desenvolvimento metódico, envolvendo testes em escala laboratorial, simulações e desenvolvimento de protótipos.
7 8	Em etapa de Industrialização, nessa fase há a necessidade de escalonamento do projeto para ambiente relevante, com objetivo de realização de testes e validação de desempenho e confiabilidade.
9	Aqui o elemento se encontra na fase de produção e comercialização, já tendo sido concluído todo o P&D expresso nas fases anteriores.

Fonte: Adaptado de ABGI Brasil (2021).

Com as adaptações das descrições e características do TRL de forma a contemplar o ciclo de vida de um projeto de PD&I em diferentes áreas e o devido fluxo de atividades em P&D, a Figura 3 exemplifica a correlação entre a maturidade de uma tecnologia, a descrição de sua fase de desenvolvimento e a escala referente a cada nível.

Figura 3 – Correlação entre os TRL, a fase de desenvolvimento e suas escalas.



Fonte: Adaptada de ABGI Brasil (2021).

A partir dos conceitos e correlações entre as fases de desenvolvimento de um projeto de PD&I, é possível indicar qual o nível de maturidade tecnológica de um projeto, conectando incentivos e fomentos à inovação que se baseiam na escala, e identificando as possibilidades disponíveis para acesso às oportunidades de recursos financeiros para inovação (ABGI BRASIL, 2021).

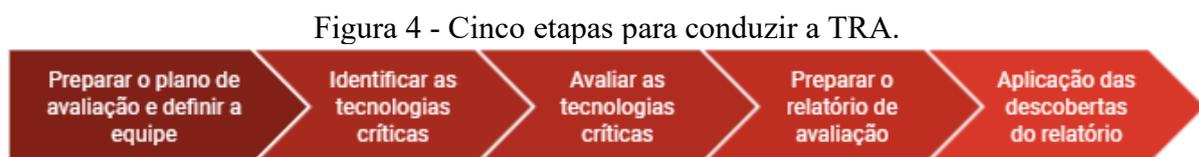
2.2. TECHNOLOGY READINESS ASSESSMENT (TRA)

A Avaliação de Maturidade da Tecnologia (TRA) se dá pelo processo sistemático e baseado em evidências que tem como objetivo avaliar a maturidade de tecnologias. A TRA utiliza as informações de maturidade tecnológica de acordo com as características da demonstração ou teste ambiente definidas na escala TRL, onde a tecnologia é testada em pontos definidos no tempo (U.S. GAO, 2020).

Ainda de acordo com o U.S. GAO (2020), a TRA deve ser conduzida e atualizada regularmente ao longo do ciclo de vida do projeto, sendo que, atualmente, não existe uma especificação do número de intervalos de tempo para a realização dessas avaliações, sendo necessário que cada parte da composição da tecnologia seja avaliada durante o desenvolvimento dessa.

A TRA é uma ferramenta fundamental no que diz respeito a atribuição de riscos associados às componentes do projeto, que permite a identificação da maturidade tecnológica e sua capacidade em operar como parte de um sistema maior em ambiente relevante, capaz de reconhecer os componentes imaturos que possam ser carregados para os últimos estágios e, eventualmente, desenvolver um plano de ação para elevação da maturidade desses. Finalmente, as conclusões obtidas através do emprego da TRA são capazes de definir diretrizes para o gerenciamento do custo e cronograma de projetos de PD&I (U.S. GAO, 2020).

De acordo com U.S. GAO (2020), são sugeridas cinco etapas para aplicação do TRA de forma eficaz, conforme exemplificado na Figura 4.



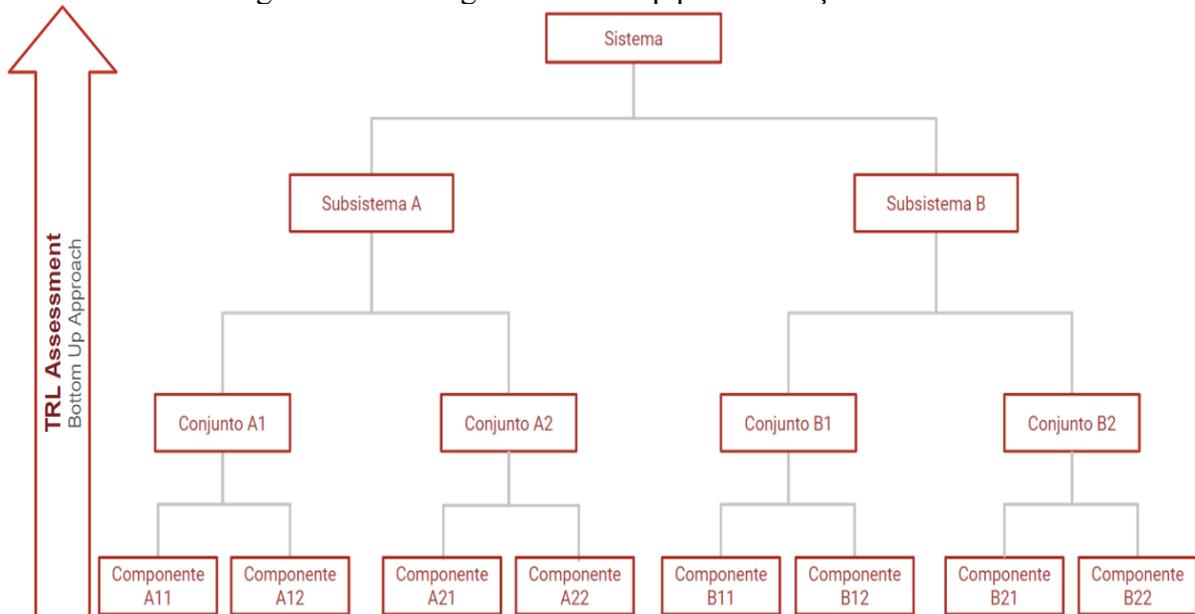
Fonte: Adaptado de U.S. GAO (2020, p. 35).

Segundo Valente (2020), o uso da TRA para avaliação de uma tecnologia completa depende da quantidade de componentes que a compõem e da maturidade de cada um deles, sendo que, conforme a complexidade e a quantidade de subsistemas e interfaces necessários para a integração da tecnologia final, é importante que se utilize de abordagens mais sistêmicas e destrinchadas.

A avaliação do sistema da tecnologia em desenvolvimento deve ser feita de forma decomposta onde há a divisão de elementos menos complexos que podem ser avaliados com

mais precisão, assim, a avaliação começa no nível mais baixo da análise e sucede em uma abordagem de baixo para cima, conforme a Figura 5 (VALENTE, 2020).

Figura 5 - Abordagem Bottom Up para avaliação de TRL.

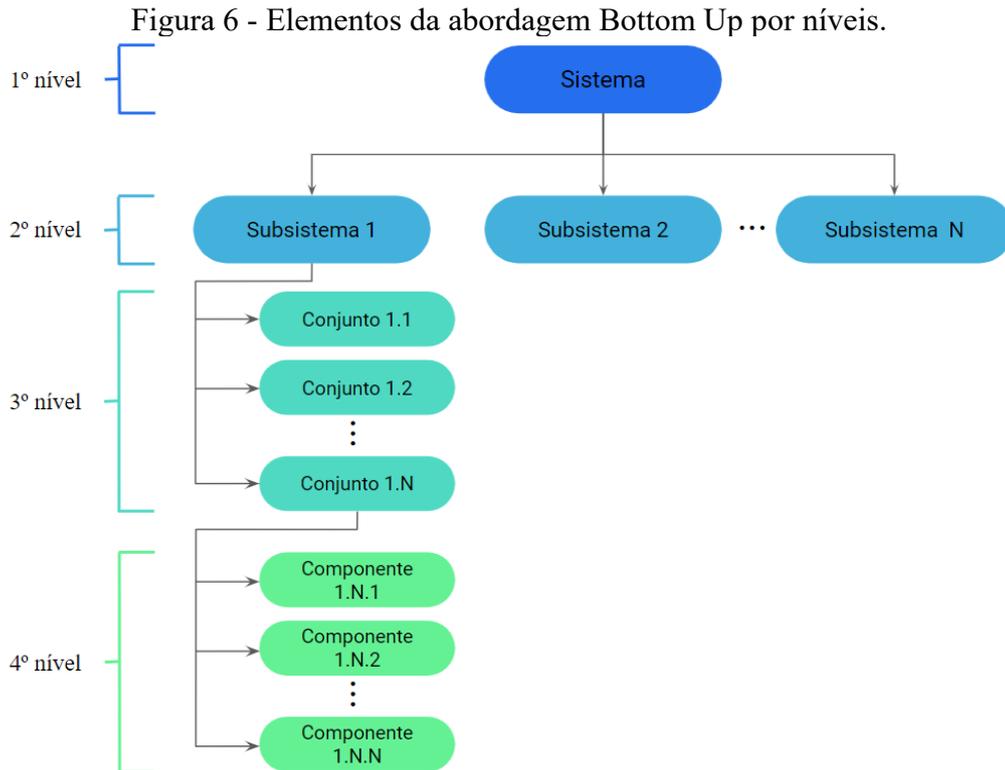


Fonte: Adaptado de API (2018).

De acordo com Xavier Junior et al. (2019), as definições para cada um dos elementos contidos na abordagem *Bottom Up* se dão por:

- Sistema: equipamento, método ou instalação que realiza uma tarefa funcional;
- Subsistema: o primeiro nível abaixo do sistema, o qual se dá pela primeira montagem de partes funcionalmente relacionadas ou interconectadas (pode-se usar como exemplo a energia elétrica);
- Conjunto: um item funcional completo ou separável em um nível inferior na abordagem (por exemplo, associado ao exemplo dado em subsistema, um amplificador);
- Componente: uma única unidade que perde funcionalidade se desassociada do restante do sistema (por exemplo, um resistor).

A Figura 6 demonstra o esqueleto de uma tecnologia e a descrição dos quatro níveis dos elementos desta através de uma simplificação. Ressalta-se que nem sempre utilizar-se a abordagem em quatro níveis, sendo esses variáveis a depender do detalhamento da análise. O nível de detalhes a serem esmiuçados e o número de componentes são essencialmente definidos na fase anterior, durante os estudos de conceito do sistema, junto à equipe técnica e de gerenciamento (XAVIER JUNIOR et al., 2019).



Fonte: Adaptado de Xavier Junior (2019, p. 5).

Assim sendo, segundo Xavier Junior et al. (2019), “a maturidade resultante do produto é a junção de todas as contribuições de componentes em termos de prontidão para cumprir as principais metas”. Bem como a maturidade, a probabilidade de sucesso da missão também é diretamente dependente do sucesso de todas as partes constituintes do sistema, logo, o risco de falha de todo o sistema também está associado ao risco de falha dos demais subsistemas, conjuntos e componentes (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

Com o emprego dessa abordagem, segue-se do pressuposto que o TRL, para cada elemento da árvore de componentes, é igual ou inferior ao TRL mínimo de seus associados. Pode-se citar como exemplo o desenvolvimento do projeto de uma parafusadeira, onde não se pode afirmar a integridade final dessa sem que comprove a confiabilidade de seus componentes, como a broca (VALENTE, 2020).

Valente (2020) também expõe em sua literatura outro exemplo de avaliação de componentes utilizando a metodologia *bottom up*. A Recommended Practice 17Q elaborada pelo American Petroleum Institute (API RP 17Q) é voltada à sistemas submarinos, onde avalia-se o TRL das componentes individualmente, devido ao fato de que estas são desenvolvidas, testadas, fabricadas e integradas a um novo sistema ou ambiente.

Segundo Valente (2020), algumas empresas prestadoras de serviços voltados para o desenvolvimento de produtos e aprimoramento de processos têm desenvolvido sua própria

metodologia de TRA e as utilizam na aplicação do gerenciamento de seus projetos. No entanto, apesar de existirem algumas ferramentas utilizadas na avaliação do TRL de tecnologias a serem desenvolvidas, não há um processo ou método que seja definido como modelo padrão para aplicabilidade da escala de maturidade tecnológica.

2.3. MODELOS DE MEDIÇÃO DE TRL

Apesar da existência de algumas metodologias e estratégias existentes nas agências governamentais e indústrias para avaliação da maturidade tecnológica de tecnologias, não há, hoje em dia, um processo para definição de TRL que seja extensamente aceita e oficialmente documentada para isso em escala mundial (VALENTE, 2020).

Desde a criação do TRL, o cenário de metodologias para aplicação deste vem se adaptando e se adequando para garantir a efetividade de seu uso e para atender a demanda por inovação tecnológica (ROCHA; MELO; RIBEIRO, 2017).

Freire (2006 apud ROCHA et al., 2017), por meio da análise do guia TRA desenvolvido GAO, discute a respeito das tecnologias não maduras em um projeto e o impacto destas no que tange ao cronograma e orçamento. De acordo com DoD (2011, apud ROCHA et al., 2017), “na tríade custo, cronograma e esforços desempenhados, a metodologia de TRL mantém a tecnologia dentro da tríade pré-estipulada em projetos complexos”. Assim, conclui-se que os benefícios da aplicação da metodologia de TRL são relevantes, e, com isso, são inúmeras as adaptações existentes na literatura.

2.3.1 Guia de TRA do Departamento de Energia dos Estados Unidos

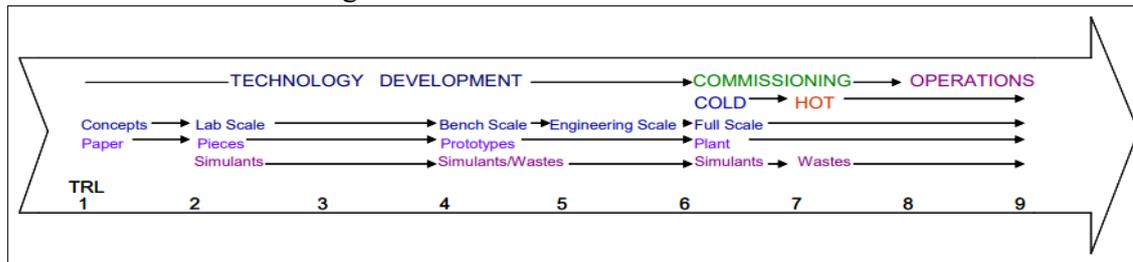
O Technology Readiness Assessment/ Technology Maturation Plan Process Guide é um documento desenvolvido pelo Escritório de Gestão Ambiental do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE-EM) que tem o intuito de orientar equipes de projetos que estarão envolvidas na condução do TRA de determinado projeto e no desenvolvimento de Planos de Maturação Tecnológica (TMP) (DOE-EM, 2010).

TRAs fornecem uma análise instantânea da maturidade das tecnologias e sua aptidão para inserção no desenvolvimento técnico do projeto e cronograma de execução. Já os TMP fornecem um detalhamento das etapas necessárias para o desenvolvimento de tecnologias que são se encontram menos maduras do que o desejado em determinada etapa do planejamento do projeto e apontam estratégias para lapidá-las até que estejam prontas para a reinserção no

projeto. Ambas são ferramentas de gestão eficazes que podem permitir a redução do risco técnico e traçar o potencial para custos impulsionados pela tecnologia, indicando aumentos e atrasos na programação inicial (DOE-EM, 2010).

A Figura 7 fornece uma ilustração do esquema sistematizado utilizado para definição do TRL em projetos desenvolvidos pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE).

Figura 7 - Sistemática do TRL do DOE.



Fonte: DOE-EM (2010, p. 5).

O guia desenvolvido fornece as condições utilizadas na adequação do método de medição TRL inicialmente proposta por Mankins, visto que, em março de 2007 o U.S. GAO recomendou que o DOE adotasse a metodologia NASA para avaliar maturidade de tecnologias em seus projetos. Assim, posteriormente, foi desenvolvida a metodologia na versão da legislação orçamentária do DOE-EM redigida pela Câmara em 2008. Neste modelo, para a correta avaliação dessas tecnologias, para a associação dos requisitos e definições de TRL com relação à escala, fidelidade do sistema e ambiente, o departamento utiliza as correspondências entre as variáveis citadas e o nível de maturidade conforme observadas na Figura 8 e Quadro 3.

Figura 8 - Definição de escala, fidelidade do sistema e ambiente para TRL.

Escala	
Escala de planta completa/real Escala de engenharia ¹ Laboratório/Bancada ¹	Coincide com aplicação final Típica (1/10 da escala completa < Sistema < Escala completa) < 1/10 da escala completa
¹ A escala de engenharia e escala de laboratório/bancada podem variar conforme o entendimento da engenharia.	
Fidelidade do sistema	
Configuração idêntica ao sistema Configuração similar ao sistema Partes Papel	Coincide com aplicação final em todos os aspectos Coincide com aplicação final em quase todos os aspectos Sistema coincide com uma ou mais partes da aplicação final Sistema existe no papel (ou seja, não há sistema <i>hardware</i>)
Ambiente	
Operacional completo Operacional limitado Relevante Simulação	Escala completa/real Escala limitada Simulação com uma escala limitada Escala de simulação

Fonte: Adaptado de DOE-EM (2010, p. 7)

Quadro 3 - Requisitos para teste de TRL.

TRL	Escala de teste	Fidelidade	Ambiente ^{1 2}
9	Completa	Idêntico	Operacional (escala completa)
8	Completa	Idêntico	Operacional (escala limitada)
7	Completa	Similar	Relevante
6	Engenharia/Escala Piloto	Similar	Relevante
5	Laboratório/Bancada	Similar	Relevante
4	Laboratório	Partes	Simulação
3	Laboratório	Partes	Simulação
2	-	Papel	-
1	-	Papel	-
¹ Os simuladores devem corresponder às propriedades físicas e químicas relevantes			
² Teste com a maior variedade possível de resíduos reais; Segurança, ALARA (<i>as low as reasonably achievable</i>), custo e risco do projeto são altamente desejáveis			

Fonte: Adaptado de DOE-EM (2010, p. 7).

Para a aplicação da TRA em projetos do DOE, inicialmente, o departamento realiza a identificação dos Elementos Críticos de Tecnologia (CTE - Critical Technology Element). Segundo o DOE-EM (2010 apud DoD TRA Deskbook, 2005):

Um elemento de tecnologia é "crítico" se os sistemas que estão sendo adquiridos dependem do elemento de tecnologia para atender aos requisitos operacionais (com custo de desenvolvimento aceitável, e com cronograma e custo de produção e operações aceitáveis) e se o elemento de tecnologia ou sua aplicação é novo ou inovador. Dito de outra forma, um elemento que é novo ou inovador, ou está sendo usado sob nova forma considerada inovadora, é crítico se este é necessário alcançar o seu pleno desenvolvimento de um sistema, aquisição ou utilidade operacional.

A identificação dos CTE é fundamental para o processo TRA, de forma que deve ser solicitada pelo líder da equipe do projeto uma lista de elementos de tecnologia. Esta lista deve ser baseada em uma revisão abrangente do projeto, analisando a estrutura de divisão de trabalho estabelecida e fluxogramas de processo (DOE-EM, 2010).

De acordo com o DOE-EM (2010), a determinação dos CTE é realizada utilizando-se de processo de 2 etapas, que utiliza dois conjuntos de perguntas para avaliar cada elemento de tecnologia. Um CTE é identificado se houver pelo menos uma resposta positiva para cada conjunto de critérios, ou seja, um elemento de tecnologia deve ter uma resposta positiva a pelo menos uma pergunta em cada conjunto de questões.

São realizadas rodadas de discussões junto à equipe do projeto para que se resolvam quaisquer divergências entre os membros no que diz respeito à determinação dos CTE e, no caso de existir discordância, o líder da equipe faz a determinação da criticidade do elemento. As questões utilizadas para a avaliação são fornecidas no Quadro 4.

Quadro 4 - Avaliação para definição de CTE.

Critérios		Sim	Não
Conjunto 1	• A tecnologia impacta diretamente um requisito funcional do processo ou instalação?		
	• Limitações na compreensão da tecnologia resultam em um risco potencial de cronograma, ou seja, a tecnologia pode não estar pronta para inserção quando necessário?		
	• Limitações na compreensão da tecnologia resultam em um risco de custo potencial, ou seja, a tecnologia pode causar custos significativos ultrapassa?		
	• Existem incertezas na definição do estado final requisitos para esta tecnologia?		
Conjunto 2	• A tecnologia é nova ou inovadora?		
	• A tecnologia foi modificada?		
	• A tecnologia foi reembalada para que um novo ambiente relevante seja realizado?		
	• É esperado que a tecnologia opere em um ambiente e / ou alcance um desempenho além de sua intenção original do projeto ou capacidade demonstrada?		

Fonte: Adaptada de DOE-EM (2010, p. 32).

Para a avaliação do TRL do sistema, ou seja, do projeto, o departamento utiliza uma versão modificada do DoD TRL Calculator, sendo este aplicado extensivamente durante a realização da TRA. A ferramenta se constitui por um processo de duas etapas. Inicialmente, utiliza-se um conjunto de questões para determinar o TRL antecipado, determinado a partir da primeira resposta afirmativa (DOE-EM, 2010).

De acordo com o DOE-EM (2010), posteriormente à avaliação antecipada, dá-se início ao preenchimento de um conjunto extenso de questões detalhadas, partindo de um nível abaixo do TRL previsto, envolvendo aspectos quanto à escala, aos sistemas e subsistemas e as especificidades técnicas da tecnologia. Para que se atinja um TRL específico, o CTE deve receber resposta afirmativa para todas as perguntas referentes a esse nível. No caso da determinação de que a tecnologia não atingiu a maturidade do nível inicial, então os próximos níveis inferiores são avaliados até que o TRL seja determinado.

Os níveis de maturidade tecnológica deverão ser documentados no relatório formal de execução da TRA. O nível TRL resoluto da aplicação da avaliação deve ser expresso numericamente e descrito conforme suas características, de forma a manter a documentação clara e concisa para eventuais aprimoramentos e desenvolvimentos da tecnologia (DOE-EM, 2010).

2.3.2. Calculadora IMATEC da Agência Espacial Brasileira (AEB)

A Agência Espacial Brasileira (AEB) é uma autoridade brasileira dada como o órgão responsável pela gestão do Programa Espacial Brasileiro (PEB) e suas funções de atuação estão definidas Lei. 8.854, de 10 de fevereiro de 1994 (MONSERRAT FILHO, 2010 apud XAVIER JUNIOR et al., 2019). A AEB supervisiona a elaboração e realiza a atualização do Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), o qual visa a adoção de futuras missões espaciais em um período de 10 anos. A execução desse Programa está descrita no Sistema Nacional de Desenvolvimento de Atividades Espaciais (SINDAE), composto por diversas instituições federais dedicadas às atividades espaciais como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

De acordo com Xavier Junior et al. (2019), pode-se definir as duas principais tarefas da AEB junto ao SINDAE por:

- Tomada de decisões sobre futuras missões espaciais e as necessidades de desenvolver tecnologias associadas a essas missões;
- Supervisão da execução de missões espaciais definidas previamente.

Em ambas as atividades existe a viabilidade da aplicação da escala TRL e do uso da metodologia de TRA, pois há a necessidade da aplicação de ferramentas de gestão específicas na avaliação dos objetivos intermediários no desenvolvimento de projeto. Assim sendo, a aplicação da TRA permite que a tecnologia possa ser constantemente avaliada a fim de decidir e avaliar sobre a praticabilidade do produto desenvolvido em uma futura missão espacial ou projeto de continuidade (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

Recentemente, o governo federal brasileiro enfatizou a necessidade de todas as instituições federais cumprirem os procedimentos de risco, controle e mitigação antes de qualquer decisão relacionada aos seus projetos e objetivos estratégicos, ou seja, os órgãos e entidades devem implementar e monitorar as etapas críticas de suas atividades com o objetivo de identificar, avaliar e gerenciar todos os riscos que possam impactar o cumprimento de metas estabelecidas pelo poder público. Isso se deu como parte da justificativa da criação de uma ferramenta de avaliação e medição de TRL como uma solução para abordar os graves problemas de mitigação de riscos em todas as fases de um projeto espacial, identificando os riscos tecnológicos desde o início (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

Além do controle de risco, outra motivação para o desenvolvimento da ferramenta IMATEC é a necessidade de aplicar a metodologia do TRA de forma consistente, garantindo efetividade na execução de projetos (KUJAWSKI, 2013 apud XAVIER JUNIOR et al., 2019).

Segundo Xavier Junior et al. (2019), para o desenvolvimento da ferramenta IMATEC, utilizou-se de base outras ferramentas gratuitamente. Estas consistem em arquivos XLS que possuem interface compatível com MS Excel e muitas dessas ferramentas dispõem de distintas formas avaliação do TRL de uma tecnologia, mesclando seus fundamentos à outras medidas, como Nível de Maturidade de Fabricação (MRL) e Nível de Maturidade de Sistemas.

As saídas dos dados são dadas em planilhas do Microsoft Excel na maioria das calculadoras desenvolvidas atualmente e disponíveis na literatura. De acordo com Xavier Junior et al., a razão pela escolha de um software frente aos arquivos XLS, se deu pelo fato de que foi considerado que essas ferramentas resultadas em planilhas estão sujeitas a várias desvantagens, como:

- Falta de controle e segurança;
- Vulnerabilidade a fraudes;
- Dificuldades no gerenciamento de dados;
- Suscetibilidade a erros humanos de vários tipos;
- Solução de problemas ineficaz.

A falta de uma estrutura de dados para a representação de uma ferramenta de TRA é uma das principais razões que justificam a criação de um software dedicado à avaliação do TRL, não seguindo com a metodologia do uso de planilhas Excel (WIRTH 1976 apud JACKSON 2001 apud XAVIER JUNIOR et al., 2019). Ainda de acordo com Xavier Junior et al. (2019), o desenvolvimento de um software uma interface gráfica simples implica na facilidade do usuário para análise no julgamento de determinado nível de maturidade para um subsistema ou componente.

2.3.2.1. O software IMATEC

Para enfatizar a calculadora como uma ferramenta ligada diretamente à escala TRL, o software foi chamado de “IMATEC”, onde “I” faz referência a “índice” e “MATEC” faz alusão a “maturidade tecnológica”. O planejamento de execução do projeto tinha como resultado final o lançamento público da ferramenta para uma avaliação inicial por parte dos usuários do

SINDAE, instituições acadêmicas brasileiras e outras agências nacionais de fomento à pesquisa (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

O IMATEC Lite, segundo Xavier Junior (2019), realiza uma consulta com o usuário, na qual o questionário dispõe de questões que seguem as disponíveis na calculadora TRL da NASA, fornecendo campos para identificação de níveis do sistema, subsistema, conjuntos e componentes. Quanto ao preenchimento das características da tecnologia a ser avaliada conforme a abordagem *Bottom Up* da TRA:

Compreensivelmente, a hierarquia é preenchida dos níveis de componentes mais baixos aos mais altos. Quando todas as perguntas sobre um determinado nível são respondidas, uma nova consulta é aberta para o próximo nível. O valor TRL de um determinado nível nunca será maior do que o encontrado entre os componentes de seus constituintes no nível imediatamente abaixo. Assim, uma montagem só estará disponível para avaliação quando todos os seus componentes foram concluídos e assim por diante (XAVIER JUNIOR et al., 2019, p. 7).

A entrada do aplicativo é representada por uma estrutura de dados (DS - Data Structure) na qual as questões preenchem a hierarquia de componentes do produto, conforme a Figura 9. A aplicação foi desenvolvida de tal forma que descarta a instalação de qualquer software, desconsiderando que o provedor do sistema precise armazenar as informações do produto fornecidas pelo usuário. O IMATEC também permite que dados referentes a produto externos sejam avaliados e salvos no próprio sistema do usuário através de um arquivo ASCII simples, que pode ser recarregado, permitindo, assim, que o usuário faça uma reavaliação em um acesso posterior ou edite informações que eventualmente sofreram mudanças (XAVIER JUNIOR et al. 2019).

Figura 9 - Tela de criação de produto da IMATEC Lite.



Fonte: IMATEC Lite (2021).

De acordo com Xavier Junior et al. (2019), o aplicativo tem quatro recursos principais de usuário:

- Criação de produto;
- Edição do produto;
- Avaliação do produto;
- Reportar resultados.

Além da criação do produto, conforme descrito anteriormente, usando a janela de edição do produto pode-se adicionar mais elementos ao produto e a cada um de seus elementos, bem como realizar mudança nos nomes e informações. O usuário então deve salvar e exportar um arquivo contendo todas as informações de entrada (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

Uma vez preenchido os campos para a edição ou criação do produto, deve-se realizar a avaliação do mesmo. Na realização dessa etapa, nota-se a possibilidade da avaliação individual de cada um dos elementos da tecnologia, procedendo sempre de baixo para cima, ou seja, realizando a abordagem *Buttom Up*, onde olha-se, inicialmente, para os componentes, posteriormente os conjuntos e assim por diante (AEB, 2018).

De acordo com o a AEB (2018), conforme as avaliações são feitas, o formulário de avaliação é disponibilizado contendo a pergunta do nível pertinente. O usuário deve responder conforme o status de cada um dos elementos do sistema em análise. De acordo com o preenchimento das perguntas de avaliação exibidas para cada elemento, novas questões são disponibilizadas, até que se finalize o questionário, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Tela de avaliação de maturidade da IMATEC Lite.

Fonte: Xavier Junior et al. (2019, p. 8).

Para a definição do nível TRL do sistema e de cada subsistema, conjunto e componente, são utilizadas como parâmetros, perguntas referentes a cada valor da escala. No caso da ferramenta IMATEC, observa-se que o questionário exibe a próxima pergunta conforme o usuário confirma a execução da atividade, garantindo a assertividade da aferição do TRL. O questionário se repete para cada elemento da abordagem *Bottom Up* e as perguntas disponibilizadas na etapa de avaliação referentes a cada nível são observadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Perguntas por nível de TRL da IMATEC Lite.

Índice	Escala	Pergunta parâmetro
1	Fase cognitiva da criação	A fase cognitiva da criação foi concluída?
2	Fase cognitiva da investigação	A fase cognitiva da investigação científica (equacionamento de ideias) foi concluída?
3	Fase cognitiva da investigação científica	Ensaaios funcionais e simulações foram concluídos?
		Todas as montagens têm nível 3?
4	Fase da investigação experimental em laboratório	Foi realizada investigação experimental em laboratório?
		As funções críticas dos subsistemas e parâmetros de desempenho foram derivadas de requisitos de medidas científicas?
		Testes de laboratório mostraram que o modelo de desenvolvimento do subsistema satisfaz aos parâmetros de desempenho e de função crítica?
5	Fase da investigação experimental no ambiente relevante (espaço simulado)	Foram realizadas investigações experimentais em ambiente relevante (espaço simulado)?
		Os parâmetros funcionais críticos e de performance para o modelo de desenvolvimento foram validados no ambiente relevante? Cite os testes ambientais realizados (no campo "Justificativa").
6	Fase da demonstração do dispositivo em ambiente relevante (espaço simulado)	A fase da demonstração do dispositivo em ambiente relevante (espaço simulado) foi concluída?
		Os requisitos funcionais essenciais e de desempenho foram derivados a partir de requisitos de medidas científicas?
		Um protótipo de subsistema demonstrou cumprir os requisitos em um ambiente relevante? Cite os testes ambientais realizados (no campo "justificativa").
7	Fase de demonstração do protótipo no ambiente operacional	O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?
8	Fase de qualificação da componente (sistema real) em testes e demonstrações	O subsistema foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional?
9	Fase de operação da componente	O subsistema encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?

Fonte: Adaptado de IMATEC Lite (2021).

Quando retornada à página de avaliação, o software mostra a classificação de nível avaliada pelo IMATCE para cada componente (AEB, 2018). Na etapa de resultados, o usuário obtém um relatório completo gerado das avaliações individuais, exibindo o nível IMATEC do produto final e listando todos os níveis intermediários de acordo com a hierarquia de entrada (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

No desenvolvimento do projeto para a proposição da ferramenta, ressalta-se que o processo de desenvolvimento de software foi baseado nas metodologias Agile e Scrum. A ferramenta, por fim, foi desenvolvida com o intuito de promover uma interação mais simples entre o usuário e a interface, buscando trazer a análise de maturidade de uma perspectiva mais detalhada e funcionando como um descritor de produto sistemático (XAVIER JUNIOR et al., 2019).

2.3.3. Calculadora de TRL do Instituto Tecnológico Aeronáutica (ITA)

Pode-se dizer que o setor aeroespacial, analisado de um viés econômico, tem estado em constante desenvolvimento, crescendo, em média, 6% ao ano e movimentando, aproximadamente, US\$ 310 bilhões no mundo (PNAE, 2012 apud ROCHA et al., 2017). Para o desenvolvimento do setor e efetividade dos projetos pertinentes a este, se faz necessário o conhecimento acerca das metodologias de avaliação de TRL para tecnologias aeroespaciais (ROCHA et al., 2017).

De acordo com Olechowski et al. (2015), a norma ISO 16290:2013 tem o intuito de padronizar os princípios básicos para a avaliação da maturidade de uma tecnologia, no entanto, cientistas do Massachusetts Institute of Technology (MIT) apontaram falhas que a norma pode vir a trazer quanto à aplicabilidade, por exemplo, a ISO 16290:2013 não avalia o *know-how* da tecnologia, apenas dados documentais, além de também não avaliar meios de transferência de conhecimento, aspectos político-legais, padronização da avaliação e realização de análise quantitativa.

Para o desenvolvimento da ferramenta, levou-se em consideração as metodologias de TRL de diferentes órgãos, sendo esses a Agência Espacial Europeia (ESA - European Space Agency), a NASA, o Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos EUA (AFRL - Air Force Research Laboratory) e o Departamento de Defesa Americano (DoD - Department of Defense). O método adaptado inicia-se na decisão da aplicação e finaliza no processo de avaliação, conforme a Figura 11. O resultado obtido com essa ferramenta se dá por dois valores de TRL, sendo um nível enquadrado somente na NBR ISO 16290:2015, e outro resultado obtido através

das aplicações dos parâmetros desenvolvidos especificamente para a ferramenta com base nas metodologias estudadas (ROCHA et al., 2017).

Figura 11 - Método avaliativo ITA.



Fonte: Adaptado de Rocha; Melo; Ribeiro (2017, p. 48).

Segundo Rocha et al. (2017), as etapas consistem em um fluxo de atividades a serem desenvolvidas, sendo essas:

- Decisão da aplicação: identificação de quando realizar uma avaliação, podendo a frequência desta ocorrer de forma pré-estabelecida ou somente sob circunstância de mudança no projeto;
- Definição da equipe: deve ser composta pelo pesquisador, conhecedor da tecnologia avaliada, pelo gestor, responsável pela missão do projeto, e pelo detentor de conhecimento acerca do ambiente operacional;
- Identificação das tecnologias: deve-se avaliar o processo como um todo, ou seja, deve-se realizar a avaliação em todas as tecnologias e elementos associados a estas;
- Recolha dos materiais: faz-se necessário o aporte total da documentação da tecnologia a ser avaliada;
- Avaliação: execução da avaliação do TRL da tecnologia.

Neste caso, a avaliação é feita através do software Microsoft Excel, visto que o desenvolvimento da metodologia foi realizado neste. A ferramenta, nomeada “Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1”, executa o processo de avaliação através de três etapas, sendo essas a demonstração da metodologia de avaliação TRL, a inserção dos dados da tecnologia a ser avaliada e avaliação do TRL total (ROCHA et al., 2017).

2.3.3.1. A ferramenta Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1

A ferramenta consiste no desenvolvimento de uma macro em Excel, onde a tela inicial contém apenas a apresentação da mesma. A planilha nomeada “ISO” possui a tabela resumida do checklist referente à ISO 16290, contendo colunas referentes ao nível de maturidade tecnológica, o marco alcançado para o elemento e a realização de trabalho (documentado), e a

planilha “MANUAL TRL” contém uma breve explicação da metodologia de nível de maturidade tecnológica e um guia de utilização da ferramenta (ROCHA et al., 2017).

De acordo com Rocha et al. (2017), a planilha referente à primeira etapa mostra os dados da tecnologia, na qual insere-se as características desta. A etapa é composta por campos de identificação, onde o usuário deve realizar o preenchimento conforme especificado, determinando o nome da tecnologia, a identificação do responsável por realizar a presente avaliação e a data da avaliação.

Seguindo na mesma planilha, faz-se necessária a determinação do grupo ao qual a tecnologia pertence, associando o nível TRL aos grupos, junto às suas respectivas características, conforme o Quadro 6 (ROCHA et al., 2017).

Quadro 6 - Associação de grupos de TRL aos níveis.

TRL	Grupo De TRL	Descrição do Grupo de TRL
1 a 3	Pesquisa e Desenvolvimento (P&D)	Atividades de pesquisa e exploração da tecnologia, descobrimento e formulação do conceito da tecnologia a ser desenvolvida.
4 a 6	Construção da Tecnologia	Desenvolvimento do conceito da tecnologia e aplicação (protótipo), prova experimental da tecnologia realizada em ambiente laboratorial relevante.
7 a 9	Validação e Produção	Demonstração em ambiente aeroespacial, sistema qualificado e missão alcançada, possibilidade de reprodução em escala, processo de parceria e transferência tecnológica para indústria.

Fonte: Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1 (2016).

Por fim, tem-se a identificação do grau de tolerância da avaliação, que consiste no percentual aceito para conclusão de um TRL. A tolerância pode ser modificada conforme identificada a necessidade por parte do gestor do projeto e o responsável pela avaliação, ou seja, para que a tecnologia na escala TRL, a tecnologia deve cumprir com os requisitos de cada nível o equivalente ao percentual escolhido (ROCHA et al., 2017).

A Figura 12 demonstra a tela referente à etapa 1 na avaliação de TRL através da Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1, contendo os campos de identificação previamente mencionados, os grupos associados aos níveis TRL e a tolerância, com exemplo preenchido em 85%.

Figura 12 - Tela inicial da Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1.

Nível de Maturidade Tecnológica- TRL

Tecnologia:
Aqui você colocará somente uma breve descrição da avaliação contendo o nome da tecnologia, a pessoa que realizará a avaliação e a data da avaliação.

Nome da: Blindagem Mista para Aeronave **Responsável pela:** Francisco Pires
Data da Avaliação: 05/set/16

Definição do grupo:
A definição do grupo delimita até qual TRL irá responder, estipulando que TRL deseja alcançar. Tendo sempre que completar a resposta do grupo.

TRL 1 a 3: Pesquisa e Desenvolvimento (P & D): Atividades de pesquisa e exploração da tecnologia, descobrimento e formulação do conceito da tecnologia a ser desenvolvida.

TRL 4 a 6: Construção da Tecnologia: Desenvolvimento do conceito da tecnologia e aplicação (protótipo), prova experimental da tecnologia realizada em ambiente laboratorial relevante.

TRL 7 a 9: Validação e Produção: Demonstração em ambiente aeroespacial, sistema qualificado e missão alcançada, possibilidade de reprodução em escala, processo de parceria e transferência tecnológica para indústria.

Tolerância:
Aqui você pode alterar os valores padrões que a planilha usa para determinar a conclusão da pergunta na avaliação de TRL do Setor Espacial.

Tolerância: 85%

INICIAR AVALIAÇÃO

Fonte: Rocha et al. (2019, p. 49).

Segundo Rocha et al. (2017), após preenchidos os campos corretamente, tem-se a segunda etapa da ferramenta de avaliação. Essa etapa consiste em um questionário, o qual contém 89 questões, sendo essas pertinentes à ISO 16290:2015, questões técnicas, questões econômicas, questões político-legais e questões documentais. O Quadro 7 contém as questões associadas a cada nível que devem ser preenchidas pelo responsável pela avaliação.

Quadro 7 - Questionário para avaliação TRL.

TRL	Questões
1	Foram identificados os princípios básicos?
	Foram identificadas potenciais aplicações para a tecnologia?
	Foram documentados os estudos que confirmam os princípios básicos?
	Foram identificadas leis e pressupostos utilizados na nova tecnologia e não proíbem o desenvolvimento?
	Foi levantada e documentada a ideia dos riscos, custos e cronograma para desenvolvimento da pesquisa tecnológica?
	Foi identificado quem e onde será realizada as pesquisas da tecnologia?

Continua

Quadro 7 - Questionário para avaliação TRL.

TRL	Questões
1	Existe fonte monetária ou interessados, stakeholders (patrocinadores) na concretização da tecnologia?
	Foi levantado se alguma outra instituição de pesquisa ou empresa está pesquisando a tecnologia no país?
	Foi realizada pesquisa em ambiente exploratório?
	Existem publicações científicas em revistas/ anais/ congressos a respeito da tecnologia?
2	Foi realizada pesquisa em ambiente de trabalho?
	Foram identificadas as principais funções a serem desempenhadas pela tecnologia?
	Foram formuladas as potenciais aplicações?
	Foi documentada a viabilidade das aplicações confirmadas por estudos?
	Foi identificada a funcionalidade da tecnologia?
	Foram identificados possíveis <i>GAP's</i> da tecnologia e documentados?
	Sabe que programa (projeto) a tecnologia vai apoiar?
	Foram identificados potenciais clientes?
Cliente demonstra interesse na aplicação?	
3	Foi concretizado a realização do projeto conceitual do elemento e documentado?
	Foi verificada a viabilidade da aplicação por experimentos de laboratório (simulação)?
	Foram identificados os possíveis defeitos da tecnologia em experimentos de laboratório?
	Foram especificados os requisitos de desempenho da tecnologia?
	Foram identificados e documentados os componentes que devem trabalhar juntos (visão sistêmica)?
	Foi plenamente demonstrada a viabilidade científica da tecnologia?
	Foram identificadas e desenvolvidas as técnicas de desenvolvimento da tecnologia?
	Foram avaliados os conceitos de fabricação da tecnologia?
	Foram identificados os componentes chaves para fabricação?
	Foi documentada a ideia dos riscos, custos e cronograma para desenvolvimento do protótipo?
4	Foram testados os componentes individuais em laboratórios e realizados relatórios?
	Foram totalmente identificados os possíveis <i>GAP's</i> da tecnologia?
	Foram identificados os requisitos gerais do sistema para aplicação aos usuários finais?
	Foi realizado o projeto conceitual da tecnologia?
	Foram estabelecidas as métricas de desempenho da tecnologia?
	Foi identificado os custos para desenvolvimento do protótipo?
	Foi realizado o cronograma para desenvolvimento do protótipo?
	Foi iniciado o programa de gestão de risco do protótipo?
	Foram iniciados os estudos de integração da tecnologia ao projeto final?
Foram realizados os relatórios de teste da placa de ensaio?	
5	Foi realizado a definição preliminar de requisitos de desempenho no ambiente relevante?
	Foi realizado o projeto preliminar do elemento, suportado por modelos apropriados para a verificação funções críticas?
	Foi realizado plano de teste de função crítica para análise dos efeitos de escala?
	Foi estipulado a definição placa de ensaio para a verificação da função crítica?

Continua.

Quadro 7 - Questionário para avaliação TRL.

TRL	Questões
5	Foram realizados os testes de teste placa de ensaio com relatórios?
	Foram identificados os efeitos das possíveis falhas da tecnologia (se houver)?
	Foram identificados os requisitos de interface de sistema?
	Foram identificadas as interações entre os componentes / subsistemas?
	Foi realizada modificações no ambiente de laboratório para aproximar ambiente operacional deixando apto a testes?
	Foram realizados testes tecnológicos dos componentes em ambiente relevante?
6	Foi realizada e documentada a definição de requerimento do desempenho e do ambiente relevante?
	Foram documentados os requisitos completos de sistema e subsistema para funcionamento?
	Foram realizadas identificação e análise das funções críticas do elemento e verificadas as funções críticas e documentadas em relatório?
	Foram concluídas as avaliações das características de desempenho da tecnologia mesmo com os possíveis <i>GAP's</i> ?
	O ambiente relevante de funcionamento para eventual sistema é conhecido?
	Foi iniciada a aquisição de dados da manutenção real, confiabilidade e dados de suporte?
7	Foi testado o modelo representativo (protótipo) completo em laboratório, ambiente operacional de alta fidelidade (simulação)?
	Foi realizado testes em cada interface do sistema / software individualmente em condições de tensão e anômalas?
	Foi simulado as funcionalidades disponíveis para demonstração em ambiente operacional?
	Foi totalmente integrado o protótipo ao ambiente real demonstrado (ou simulado ambiente operacional)?
	Foi realizado teste com sucesso do protótipo do sistema em um ambiente estipulado?
	Foi realizado documentação do teste do modelo de protótipo?
	Foi documentada a ideia dos riscos, custos e cronograma para desenvolvimento da tecnologia em escala?
	Foi documentada a definição de requisitos de desempenho?
Foi documentada a definição do ambiente operacional?	
8	Foi documentada a definição do modelo e da realização do teste?
	Foi construído e integrado o modelo final no sistema final? (produto)
	Foram realizados ajustes dos componentes a suas funções para deixar compatível com o sistema operacional?
	Foi testado o sistema e caracterizado com seu design e função para a aplicação pretendida?
	Foram demonstrados os resultados e funcionamentos e a função da tecnologia em eventual teste de sistema de plataforma?
	Foi concluído o processo de controle da interface?
	Foi concluída a documentação formal de regulamentação?
	Foi concluída a documentação da gestão e controle de configuração?
	Foram demonstradas todas as funcionalidades em ambiente operacional simulado e sistema qualificados através de teste e avaliação na plataforma real?
Foi identificado que o sistema atende às especificações?	

Continua.

Quadro 7 - Questionário para avaliação TRL.

TRL	Questões
8	Foi iniciado no programa de gestão de risco em parceria com o desenvolvimento com a indústria?
	Foi identificado os custos para desenvolvimento da tecnologia em escala ou transmitido o conhecimento em parceria com a indústria?
	Foi estipulado cronograma para desenvolvimento em escala da tecnologia ou realizado trabalho em parceria com a indústria?
9	Foi realizado comissionamento na fase de operação inicial?
	Foram finalizados os relatórios de operação em voo?
	Foi plenamente demonstrado o sistema real?
	Foi implementado com sucesso o conceito operacional?
	Foi instalada e implantada a tecnologia em plataforma de sistema antes destinado?
	Foi realizada através de operações de missão bem sucedida o sistema de missão real "voo comprovado"?
	Foram realizados todos os processos de fabricação controlados para o nível de qualidade adequado?
	Foi incluída na documentação o processo de desenvolvimento em escala, o custo e o cronograma para tal desenvolvimento?
	Foi incluída na documentação final o processo de parceria e de transferência de conhecimento para indústria?
	Foi realizado plano de negócio para desenvolvimento da tecnologia?
	Foram realizadas publicações científicas e/ou patentes a respeito da tecnologia?
É possível reproduzir o mesmo projeto com mesmos requisitos?	

Fonte: Adaptado de Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1 (2016).

Para resolução do questionário através da ferramenta disponibilizada através do software Excel, deve-se atentar à primeira coluna, onde há a especificação de cada questão com demarcação “I” e “E”, conforme a Figura 13. As marcadas com a letra “I” são referentes ao *checklist* da NBR ISO 16290:2015 e se caracterizam por binárias, ou seja, somente são respondidas se atendem ou não ao critério estipulado, que, se positivo, deve ser selecionando o quadrado na coluna 4. As questões marcadas com a letra “E” são respondidas em percentual já realizado, que pode ser estipulado de 0 a 100, seguindo múltiplos de 5 (ROCHA et al., 2017).

Figura 13 - Exemplo para a coluna "I" e "E" do TRL 1.

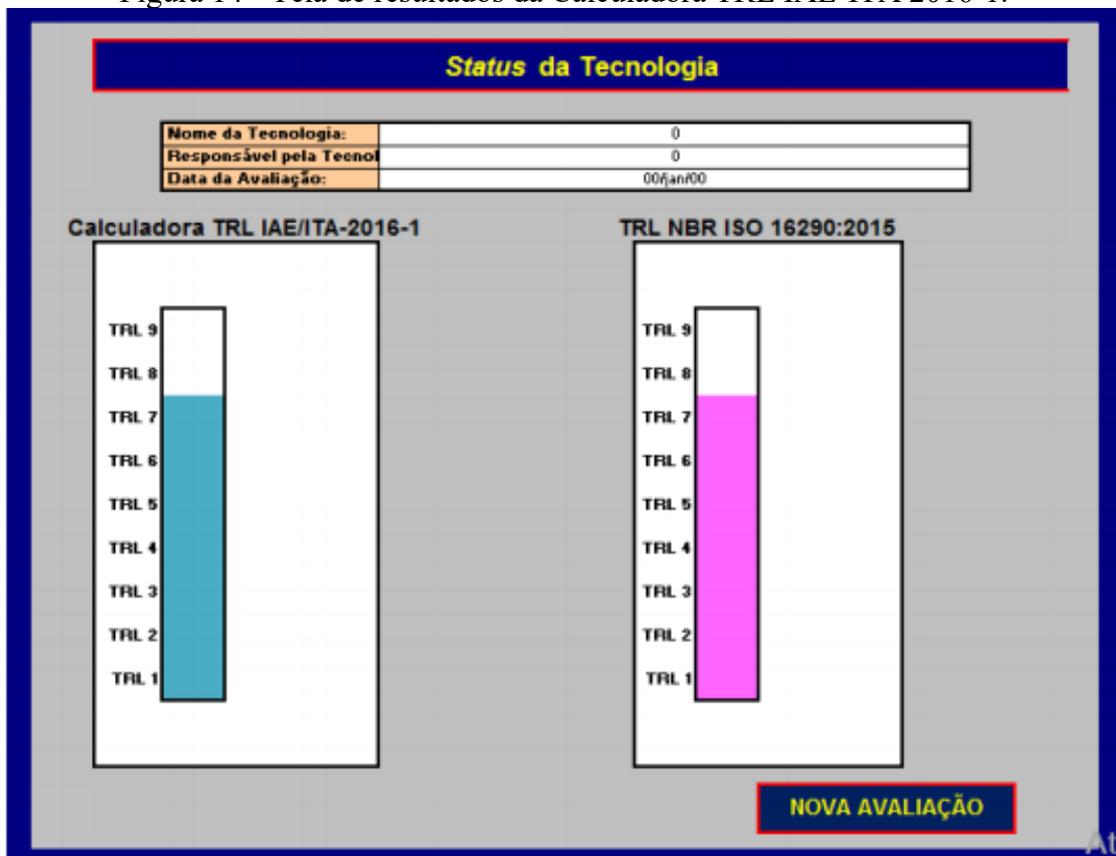
ISO	ESP	% Completa	TRL 1 - Princípios básicos observados e relatados
I			<input checked="" type="checkbox"/> Foram identificados os princípios básicos?
I			<input checked="" type="checkbox"/> Foram identificadas potenciais aplicações para a tecnologia?
E	< >	70	<input checked="" type="checkbox"/> Foram documentados os estudos que confirmam os princípios básicos?
E	< >	100	<input checked="" type="checkbox"/> Foram identificadas leis e pressupostos utilizados na nova tecnologia e não proibem o desenvolvimento?
E	< >	100	<input checked="" type="checkbox"/> Foi levantada e documentada a ideia dos riscos, custos e cronograma para desenvolvimento da pesquisa tecnológica?
E	< >	100	<input checked="" type="checkbox"/> Foi identificado quem e onde será realizada as pesquisas da tecnologia?
E	< >	100	<input checked="" type="checkbox"/> Existe fonte monetária ou interessados, stakeholders (patrocinadores) na concretização da tecnologia?
E	< >	100	<input checked="" type="checkbox"/> Foi levantado se alguma outra instituição de pesquisa ou empresa está pesquisando a tecnologia no país?
E	< >	100	<input checked="" type="checkbox"/> Foi realizada pesquisa em ambiente exploratório?
E	< >	100	<input checked="" type="checkbox"/> Existem publicações científicas em revistas/ anais/ congressos a respeito da tecnologia?

Fonte: Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1 (2016).

Segundo Rocha et al. (2017), “Esse processo de avaliação acontece em todas as questões desenvolvidas. Cada nível de TRL apresenta um conjunto de questões que foram desenvolvidas na metodologia proposta, aqui chamada de questionário de TRL”.

Após a resolução do questionário, a ferramenta exibe um resultado determinando o comparativo entre a avaliação pertinente à NBR ISO 16290:2015 e o resultado englobando todos os parâmetros levantados através da revisão bibliográfica de modelos existentes (ROCHA et al., 2017). A Figura 14 mostra a tela impressa resultante da avaliação TRL executada pela Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1.

Figura 14 - Tela de resultados da Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1.



Fonte: Rocha et al. (2017, p. 52).

A aplicação da ferramenta Calculadora TRL IAE/ITA-2016-1, no Microsoft Excel, permite a padronização, viabilidade e agilidade do processo de definição do nível TRL de tecnologias. A metodologia proposta possibilitou análise e adaptação dos conceitos de TRL em diferentes contextos, do setor espacial e de defesa, em projetos concluídos e em andamento, além de ser aplicável em tecnologias com visão sistêmica e também em tecnologias de base (ROCHA et al., 2017).

2.3.4. Calculadora de TRL do Clean Growth Hub do Governo do Canadá

O Clean Growth Hub liderou o desenvolvimento dessa ferramenta para aferição do TRL sob responsabilidade do Administrative Data Component, segmento associado à Estratégia de Clean Technology Data (CTDS - Clean Technology Data Strategy) do Governo do Canadá (GOVERNO DO CANADÁ, 2020).

De acordo com o Governo do Canadá (2020), as atividades referentes à introdução de tecnologia limpa no Canadá contribuíram para o crescimento sustentável e a transição para uma economia de baixo carbono. Os projetos voltados a essas atividades fornecem soluções ambientais para questões como mudanças climáticas, poluição do ar e da água e escassez de recursos, ressaltando que tecnologias limpas também contribuem para o crescimento econômico e a diversificação, aumentando o acesso aos mercados internacionais e impactando positivamente na geração de novos empregos.

Assim sendo, o Governo do Canadá forneceu a quantia equivalente a US\$ 14,5 milhões ao longo de quatro anos no Orçamento de 2017 para estabelecer a Estratégia de Dados de Tecnologia Limpa (CTDS). Essa Estratégia visa garantir que os dados estejam disponíveis para a compreensão da contribuição econômica e ambiental das tecnologias limpas no Canadá (GOVERNO DO CANADÁ, 2020).

A respeito da definição e atividades pertinentes a CTDS, segundo o Governo do Canadá (2020):

A Estratégia, que é uma iniciativa conjunta liderada por Recursos Naturais do Canadá (NRCan - Natural Resources Canada), Inovação, Ciência e Desenvolvimento Econômico do Canadá (ISED- Innovation, Science and Economic Development Canada), *Clean Growth Hub* e Estatísticas do Canadá (StatCan - Statistics Canada), ampara a coleta de dados e relatórios regulares sobre atividades de tecnologia limpa. Dados mais sofisticados fortalecem a base de evidências para decisões, melhoram a compreensão do cenário de tecnologia limpa emergente e garantem a criação de políticas e programas impactantes para apoiar a produção e adoção de tecnologia limpa.

A CTDS possui três componentes principais, tendo cada um desses uma atividade macro específica:

- Desenvolvimento e disseminação de estatísticas confiáveis de tecnologia limpa (liderado pelo StatCan): ampliar a coleta e produção de estatísticas e indicadores macroeconômicos sobre economia de tecnologia limpa;
- Dados da indústria (liderado pelo NRCan): coleta de dados a nível organizacional para estabelecimento de um conjunto comum de indicadores

entre os setores, permitindo uma melhor compreensão dos desafios e oportunidades enfrentados pelas empresas de tecnologia limpa;

- Dados administrativos (liderado pelo Clean Growth Hub): uso de dados administrativos existentes para rastrear os impactos dos programas governamentais que apoiam a tecnologia limpa.

O componente de Dados Administrativos se refere aos dados que os programas governamentais coletam de candidatos e beneficiários de financiamento durante a administração da CTDS. Esse tipo de acompanhamento permite o aumento da capacidade federal de rastrear os investimentos do governo e seus impactos no que tange ao uso de tecnologia limpa. Para isso, a Estratégia desenvolve orientações para os programas, de modo que os dados coletados do programa sejam mais consistentes e complementares aos dados coletados pelos outros componentes da Estratégia (GOVERNO DO CANADÁ, 2020).

De acordo com o Clean Growth Hub (2021), tendo isso em vista, iniciou-se o desenvolvimento da ferramenta de avaliação do nível de maturidade tecnológico. Com a justificativa de que conhecer o TRL de sua tecnologia é importante devido ao fato de que muitos dos programas de tecnologia limpa direcionam seu financiamento para projetos em diversos estágios de desenvolvimento, a ferramenta foi desenvolvida de forma a agrupar os nove níveis de TRL associados a quatro estágios de desenvolvimento tecnológico, sendo a pesquisa fundamental, pesquisa e desenvolvimento, piloto e demonstração e adoção antecipada.

Para o desenvolvimento da ferramenta, o Clean Growth Hub levou em consideração alguns princípios orientadores que deveriam ser aplicados ao determinar o TRL de uma tecnologia. Esses princípios estão descritos conforme o Quadro 8.

Quadro 8 - Princípios orientadores.

Princípio orientador	Descritivo
Início do estágio de desenvolvimento mais amplo.	Ao determinar um TRL, definiu-se como mais importante que se inicie com o estágio geral de desenvolvimento da tecnologia antes de avaliar o TRL específico.
Erro no lado conservador.	Se houver incertezas quanto a se uma tecnologia está em um determinado TRL, o TRL inferior deve ser atribuído.
Garantir que o ambiente operacional está compreendido.	É importante ter clareza na compreensão das condições reais esperadas, se é possível manter fidelidade e como o ambiente de teste (por exemplo, laboratório, simulado ou operacional) representa essas condições.
Um TRL só é válido para o ambiente operacional específico para o qual foi testado.	Se o desenvolvimento da tecnologia deve ser implantada em um ambiente operacional diferente do que o testado, a tecnologia não seria mais considerada totalmente desenvolvida e precisaria ser testado e aprimorado para o novo ambiente operacional a ser considerado no mesmo TRL.

Fonte: Adaptado de Clean Growth Hub (2021).

Os princípios orientadores serviram como guia para a escolha dos parâmetros utilizados na determinação do TRL e o questionário base de cada nível para análise das atividades executadas até o presente momento (CLEAN GROWTH HUB, 2021).

De acordo com o Clean Growth Hub (2021), a ferramenta fornece uma descrição de cada TRL junto à uma lista de verificação para determinar se a tecnologia está em determinado nível. A tela referente ao modelo apresenta um quadro com cinco colunas, sendo essas representadas por:

- Estágio de desenvolvimento tecnológico;
- TRL;
- Definição;
- Descrição;
- Checklist de atividades para alcançar o nível.

Conforme pode-se observar na Figura 15, na coluna de estágio de desenvolvimento tecnológico são apresentadas as condições de escala no desenvolvimento da tecnologia, desde a pesquisa fundamental até a adoção antecipada. A coluna de TRL mostra os níveis de 1 a 9 e a coluna de definição e descrição apresentam as características referentes a cada nível de maturidade.

Figura 15 - Questionário da Calculadora de TRL do Clean Growth Hub.

Technology Development Stage	TRL	Definition	Description	Checklist of activities to achieve this level
Fundamental Research	1	Basic principles observed and reported	Scientific research begins with properties of a potential technology observed in the physical world. These basic properties are being reported in the literature.	<input type="checkbox"/> Basic research activities have been conducted and basic principles have been defined <input type="checkbox"/> Principles and findings have been published in the literature (e.g., research articles, peer-reviewed papers, white papers)
	2	Technology and/or application concept formulated	Applied research begins with identification of practical applications of basic scientific principles. There is an emphasis on understanding the science better and corroborating the basic scientific observations made during TRL 1 work. Analysis of the feasibility of speculative applications is being conducted and reported in scientific studies.	<input type="checkbox"/> Applications of basic principles have been identified <input type="checkbox"/> Applications and supporting analysis have been published in the literature (e.g., analytical studies, small code units for software, papers comparing technologies)
Research and Development	3	Experimental proof of concept	Active research and development begins. The applications are being moved beyond the paper stage to experimental work. Feasibility of separate technology components are being validated through analytical and laboratory studies. There is not yet an attempt to integrate components into a complete system.	<input type="checkbox"/> Proof of concept and/or analytical and experimental critical function has been developed <input type="checkbox"/> Separate components have been validated in a laboratory environment

Fonte: Clean Growth Hub (2021, p. 2)

De acordo com o Clean Growth Hub (2021), na coluna de checklist de atividades são mostradas diferentes perguntas que fazem alusão ao nível em análise. Tais perguntas são

utilizadas como parâmetros para a definição do TRL da tecnologia a ser avaliada, e podem ser observadas no Quadro 9, associadas às características do nível em questão.

Quadro 9 - Perguntas para parâmetro avaliativo.

TRL	Perguntas utilizadas como parâmetro
1	Atividades básicas de pesquisa foram realizadas e princípios básicos foram definidos
	Princípios e descobertas foram publicados na literatura (por exemplo, artigos de pesquisa, revisão de artigos e pesquisas)
2	As aplicações dos princípios básicos foram identificadas
	Aplicações e análises de suporte foram publicadas na literatura (por exemplo, estudos analíticos, pequenas unidades de código para software, artigos comparando tecnologias)
3	Prova de conceito e / ou analítica e função crítica experimental foi desenvolvida
	Componentes separados foram validados em um ambiente de laboratório
4	Componentes integrados “ad-hoc”, subsistemas e/ou processos foram validados em um ambiente laboratorial
	A dúvida de como a integração “ad-hoc” e os resultados do teste diferem a partir dos objetivos esperados do sistema foi compreendido
5	Componente e subsistemas ou processos foram validados ambiente simulado
	Dúvida de como o ambiente simulado difere do ambiente operacional esperado, e como o resultado dos testes se comparam com as expectativas são compreendidos
6	Modelo em escala piloto ou protótipo desenvolvido
	O modelo em escala piloto ou sistema de protótipo está perto da configuração desejada em desempenho e volume, mas geralmente menor do que a escala completa
	O protótipo em escala piloto ou sistema modelo foi demonstrado em um ambiente simulado
	Dúvida de como o ambiente simulado difere do ambiente operacional e como os resultados diferiram das expectativas é entendido
7	Protótipo em escala total com forma pronta, ajuste e função desenvolvida
	Protótipo em escala real demonstrado em um ambiente operacional, mas sob condições limitadas
8	Configuração final da tecnologia desenvolvida
	Configuração final testada com sucesso em um ambiente operacional
	A capacidade da tecnologia de atender aos seus requisitos de funcionamento foi avaliada e problemas foram documentados. Planos, opções ou ações para resolver problemas foram determinados
9	A tecnologia foi implantada com sucesso e comprovada sob uma ampla gama de condições operacionais
	Relatórios operacionais, de teste e avaliação foram completados
Comercialmente disponível	A tecnologia está abertamente disponível no mercado e/ou foi vendida em seu estado atual de oferta de serviço

Fonte: Adaptado de Clean Growth Hub (2021, p. 2)

Conforme o Clean Growth Hub (2021), o desenvolvimento da ferramenta leva em consideração que uma tecnologia atingiu um TRL específico se atendeu aos requisitos para esse nível e todos os níveis anteriores, ou seja, uma tecnologia está em um determinado TRL se a equipe de pesquisa está atualmente trabalhando para cumprir os requisitos específicos para aquele nível.

Assim, para fins de projetos e oportunidades relacionadas à tecnologia limpa, deve-se utilizar a ferramenta como suporte à definição do nível TRL e para descrever as atividades realizadas e quais os próximos passos (CLEAN GROWTH HUB, 2021).

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que tange ao desenvolvimento de projetos de inovação, a definição do TRL das tecnologias envolvidas é imprescindível para que haja o pleno funcionamento do produto final. Esta etapa é crucial para a previsibilidade de riscos e correta atribuição de tarefas a serem cumpridas para o progresso do projeto, permitindo o gerenciamento dos custos e do cronograma de forma eficaz.

A avaliação deve ser atualizada continuamente ao longo do ciclo de vida do projeto, com o intervalo entre estas a ser definido a depender da tecnologia em questão. Também, ressalta-se a importância da realização dessa medição de forma robusta e detalhada, utilizando-se de abordagens que permitam a segmentação da tecnologia e a análise individual de cada elemento que a compõe.

A realização da pesquisa bibliográfica de cada modelo e ferramenta discutidos previamente permitiu o desenvolvimento de uma análise crítica, a qual resultou no levantamento de características relacionados a esses modelos, podendo-se identificar os aspectos positivos e negativos pertinentes a cada uma das abordagens.

Assim sendo, o Quadro 10 exemplifica as considerações acerca de cada modelo estudado, características as quais serão utilizadas para a definição dos parâmetros determinados para a proposição do modelo objetivo deste trabalho.

Quadro 10 - Considerações finais por modelo.

Referência	Abordagem	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Department of Energy – Office of Environmental Management (DOE-EM)	Guia de TRA	<ul style="list-style-type: none"> Definição clara dos níveis relacionados à escala, à fidelidade do sistema e ao ambiente nos quais os diversos elementos da tecnologia devem pertencer para atingir determinada maturidade; Determinação prévia da criticidade dos elementos que fazem parte da tecnologia a ser avaliada. Essa especificidade permite a previsibilidade de riscos que poderiam impedir a ascensão do nível TRL da tecnologia. 	<ul style="list-style-type: none"> O modelo não apresenta uma ferramenta que seja intuitiva, visto para a realização da avaliação da maturidade da tecnologia é necessário que se responda um questionário, no qual a resolução deste resultará na determinação do nível TRL da tecnologia.
Agência Espacial Brasileira (AEB)	Calculadora IMATEC Lite	<ul style="list-style-type: none"> O modelo apresenta clareza no que tange à determinação da hierarquia de cada elemento do sistema, ou seja, são mapeados o sistema, subsistema, e componentes da tecnologia e a resolução da avaliação se dá pela abordagem <i>bottom up</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Range</i> de perguntas referentes a cada nível menos detalhado quando comparado aos demais modelos.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)	Calculadora TRL IAE/ITA-2016-1 TRL NBR ISO 16290:2015	<ul style="list-style-type: none"> O modelo apresenta um bom detalhamento nas questões utilizadas para avaliação da tecnologia; Existe a correlação tanto da análise de medição desenvolvida pela NASA, quanto a análise referente à ISO 16290. 	<ul style="list-style-type: none"> O modelo não realiza um detalhamento específico dos elementos críticos da tecnologia previamente à execução da avaliação, assim, a definição do TRL se dá de forma geral.
Clean Growth do Governo do Canadá	Calculadora TRL	<ul style="list-style-type: none"> Para desenvolvimento do modelo, foram utilizados princípios orientadores e premissas consideráveis, assim, abrangendo conceitos aplicáveis de TRL. 	<ul style="list-style-type: none"> Baixo nível de detalhamento no que tange às questões a serem respondidas para cada nível; Não considera a definição dos CTE previamente ao início da avaliação.

Fonte: A Autora (2021).

3. PROPOSIÇÃO DE MODELO

Este capítulo apresenta a proposta do modelo para avaliação de TRL de tecnologias em projetos de PD&I. O modelo proposto constitui-se de diferentes conceitos extraídos da revisão da literatura, adequando as metodologias e aplicações estudadas e agregando parâmetros considerando o ciclo de vida do produto.

Para o desenvolvimento do modelo, optou-se por utilizar o software Microsoft Excel, devido à facilidade de aplicabilidade e difusão do uso deste por grande parte dos setores relacionados ao desenvolvimento de projetos de PD&I.

Na Seção 3.1 é apresentada a parte inicial do modelo, onde formula-se a equipe que fará parte do projeto. Na seção 3.2 são apresentados os conceitos utilizados para a definição dos elementos críticos de tecnologia, a qual definiu-se por ser feita previamente à inicialização da avaliação do TRL resultante. Por fim, na seção 3.3 são expostos a formulação do processo de avaliação do TRL, os pressupostos e fontes que foram utilizados como base do modelo e abordagem determinada para realização da avaliação.

3.1. DADOS INICIAIS DO PROJETO

Considerando-se as referências encontradas no Guia de TRA do DOE-EM (2010), se faz extremamente necessária a definição da equipe envolvida no projeto previamente ao início da execução do mesmo. Algumas partes acabam por ser definidas com o andamento do projeto, principalmente no que tange aos agentes externos, mas a equipe responsável pela pesquisa, gerenciamento do projeto, estudos técnicos e clientes são alguns dos agentes necessários a serem definidos de maneira prévia.

Segundo o DOE-EM (2010), a definição de uma equipe antes da inicialização do projeto permite uma melhor estratégia no que diz respeito ao TMP, ou seja, com uma equipe bem estruturada, torna-se mais fácil e seguro mapear ações para trazer CTE imaturos até o TRL desejado. Este planejamento inclui a formulação de cronogramas preliminares e estimativas aproximadas de custos de ordem de magnitude que permitem a tomada de decisão para definição da viabilidade do desenvolvimento da tecnologia.

A importância de uma estratégia robusta se dá pelo fato de que os planos de teste detalhados ao longo do desenvolvimento da tecnologia, no ciclo de vida do projeto, que

forneçam as informações de análise e mitigação de riscos, devem ser incorporados à linha de base do projeto.

A definição da equipe de TRA, ou seja, a equipe responsável pela avaliação do TRL da tecnologia, e da equipe de execução do projeto, líder e membros da equipe, é um requisito fundamental para a condução de uma avaliação efetiva e segura (DOE-EM, 2010). Idealmente, a equipe deve ser composta por indivíduos tanto da organização que se responsabilizará pela condução do P&D da tecnologia, quanto por membros de organizações externas, voltadas aos órgãos de fomento, patrocinadores, codesenvolvedores e clientes.

Assim sendo, o modelo fornece uma etapa apenas para coleta dos dados iniciais do projeto, onde deve-se preencher, inicialmente, o nome dado ao projeto, a data de avaliação, para que sejam organizadas as avaliações de TRL refeitas ao longo do ciclo de vida do projeto, e um campo para preenchimento com uma descrição breve do projeto e objetivos pretendidos, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Tela de dados do modelo.

The screenshot shows a web interface titled 'CALCULADORA TRL' with a sub-header 'INICIALIZAÇÃO DA AVALIAÇÃO'. Below this is a section 'DADOS INICIAIS DO PROJETO' containing two input fields: 'NOME DO PROJETO' with the value 'Furadeira Inovadora 2' and 'DATA DA AVALIAÇÃO (coloque no formato dd/mm/aa)' with the value 'domingo, 29 de agosto de 2021'. Below these is a large text area labeled 'DESCRIÇÃO DO PROJETO E OBJETIVOS A SEREM ALCANÇADOS'.

Fonte: A Autora (2021).

Posteriormente, ainda na mesma etapa do modelo, deverão ser preenchidos o campo referente ao líder do projeto, responsável pelo gerenciamento, principalmente de cronograma, custos e riscos, e da equipe do projeto, onde deverão ser listados o nome, função e empresa da qual faz parte cada participante, conforme a Figura 17.

Figura 17 - Dados da equipe.

The screenshot shows a section titled 'EQUIPE'. It features a text input field for 'LÍDER DO PROJETO'. Below it is a table with the title 'EQUIPE DO PROJETO' and three columns: 'Nome', 'Função', and 'Empresa'. The table has several empty rows for data entry.

Fonte: A Autora (2021).

3.2. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS CRÍTICOS DE TECNOLOGIA

O desenvolvimento do modelo para aplicabilidade da escala TRL, tem como objetivo aumentar a assertividade da avaliação de TRL de tecnologias em projetos de inovação. Com uma definição de escala apropriada, permite-se mitigar os possíveis riscos que podem vir a aparecer conforme o andamento do ciclo de vida do projeto, além de proporcionar diretrizes mais claras para um gerenciamento de custos e alocação de equipe eficaz.

Segundo o DOE-EM (2010), a identificação da criticidade dos elementos inclusos no sistema de desenvolvimento da tecnologia como um todo se mostra como uma etapa crucial no que tange à análise detalhada e eficaz do TRL do projeto. Com o devido reconhecimento de quais são os CTE envolvidas no projeto e a avaliação individual destas, pode-se chegar a um valor da escala de maturidade mais robusto e exato.

Para o modelo proposto, optou-se por realizar uma etapa exclusiva de avaliação dos elementos da tecnologia e identificação da criticidade desses, de forma que foram utilizadas como referência as perguntas que constam no questionário determinado para CTE do Guia de TRA do DOE-EM.

No Guia do DOE-EM, são utilizados dois conjuntos de questões que devem ser respondidos para cada elemento que compõe a tecnologia. Caso haja pelo menos uma resposta positiva em cada um dos conjuntos de perguntas, o elemento é definido como crítico, ou seja, o pleno funcionamento do sistema e a gradação do nível de maturidade da tecnologia dependem do desenvolvimento desse elemento em análise.

Entende-se por CTE os elementos que compõe a tecnologia absoluta a ser desenvolvida em um projeto de P&D. De acordo com o DOE-EM (2010), deve-se orientar para que o líder do projeto, junto à equipe de desenvolvimento, realize uma revisão abrangente dos elementos que o compõe, analisando a estrutura a ser desenvolvida, podendo-se utilizar de fluxogramas de processos e outros ferramentais, para que seja definida a lista de elementos da tecnologia.

Assim sendo, inicialmente, na etapa de determinação de CTE, o modelo propõe a definição da lista de elementos que compõe a tecnologia e que devem passar pela avaliação de criticidade. O avaliador deve, então, sinalizar o número de elementos contidos na tecnologia, e preencher a lista com esses elementos. A Figura 18 demonstra a lista de elementos do projeto de uma furadeira, como exemplo do funcionamento da ferramenta.

Figura 18 - Tela de definição de CTE.

Sugere-se que nesta etapa seja feita uma revisão abrangente do projeto, analisando minuciosamente a estrutura da tecnologia, para que seja determinada a lista de elementos que compõe a tecnologia a ser avaliada.

NÚMERO DE ELEMENTOS: 8

LISTA DE ELEMENTOS	CRÍTICO?
1 Base	
2 Coluna	
3 Mesa	
4 Sistema moltriz	
5 Alavanca de movimentação	
6 Árvore de trabalho	
7 Mandril	
8 Broca	
-	

Preencha, inicialmente, o número de elementos que compõe a tecnologia, e, depois, preencha a tabela ao lado com a lista de elementos da tecnologia a ser avaliada.

Realize a avaliação de criticidade através do formulário abaixo da tabela de elementos para cada elemento contido na lista, selecionando na coluna K se esse se enquadra ou não como elemento crítico de tecnologia, conforme o resultado retornado em "criticidade" ao final da avaliação.

Fonte: A Autora (2021).

Após o preenchimento da lista de elementos, o avaliador deve, para cada item, realizar a avaliação da criticidade. Nesta etapa, serão utilizadas as questões do Guia do DOE-EM como base para a formulação do questionário de criticidade de elementos. As perguntas formuladas foram:

- O elemento é considerado inovador?
- O elemento deverá operar de forma diferente do que está operando atualmente ou alcançar desempenho superior ao seu projeto inicial?
- O elemento impacta diretamente o pleno funcionamento da tecnologia absoluta?
- O não desenvolvimento do elemento poderia, potencialmente, frear o alcance do TRL 9 futuramente? (Lançamento no mercado)
- Existem limitações quanto ao uso do elemento que podem gerar risco de atraso de cronograma quando necessária a inserção deste no modelo final?
- Existem limitações quanto ao uso do elemento que podem gerar risco de custo quando necessária a inserção deste no modelo final?

A avaliação se dará de forma que o avaliador deverá selecionar “Sim” ou “Não” para as questões, e ao final, será retornado o elemento como crítico ou não, conforme o exemplo do projeto de furadeira na Figura 19, onde avaliou-se o elemento “broca”, considerado um CTE.

Figura 19 - Bloco de perguntas para criticidade de elementos.

Elemento	8	Criticidade:	Elemento Crítico
Não		O elemento é considerado inovador?	
Sim		O elemento deverá operar de forma diferente do que está operando atualmente ou alcançar desempenho superior ao seu projeto inicial?	
Sim		O elemento impacta diretamente o pleno funcionamento da tecnologia absoluta?	
Sim		O não desenvolvimento do elemento poderia, potencialmente, frear o alcance do TRL 9 futuramente? (Lançamento no mercado)	
Sim		Existem limitações quanto ao uso do elemento que podem gerar risco de atraso de cronograma quando necessária a inserção deste no modelo final?	
Sim		Existem limitações quanto ao uso do elemento que podem gerar risco de custo quando necessária a inserção deste no modelo final?	

Fonte: A Autora (2021).

Tendo o resultado, o avaliador poderá preencher a terceira coluna da lista de acordo com o nível de criticidade para cada elemento avaliado.

A importância da definição dos elementos críticos se dá para que haja o acompanhamento esmiuçado do desenvolvimento destes, visando que não haja, posteriormente, algum impeditivo na etapa final do projeto.

3.3. ETAPA DE AVALIAÇÃO DO TRL

De acordo com Valente (2020), a avaliação eficiente de uma tecnologia depende da quantidade de elementos que a compõe e da complexidade de cada um deles. Na proposta do presente modelo, a avaliação da tecnologia será feita de forma decomposta, seguindo os conceitos da abordagem *bottom up*, onde os elementos que compõe o projeto são analisados de forma individual, iniciando pelos componentes e seguindo para a avaliação dos conjuntos e subsistemas. Assim, permite-se que a tecnologia seja analisada minuciosa e precisamente, a partir da identificação dos elementos complexos, críticos, que foi feita na etapa de definição das CTE.

Para a aplicação dessa abordagem na avaliação de TRL, as perguntas relacionadas a cada nível da escala foram formuladas de forma a serem, além de abrangentes no que tange aos conceitos de TRL absoluto de projetos de inovação, direcionadas a aspectos voltados aos elementos críticos.

3.3.1. Modelo

Empregando os conceitos da abordagem *bottom up* e utilizando de referências obtidas na revisão da literatura das ferramentas estudadas, a aplicação da avaliação do TRL foi realizada através de questionário, onde as perguntas são aplicadas em conjuntos, os quais se referem, cada um, a um valor da escala de maturidade. O avaliador deve, então, responder às perguntas na ordem em que são apresentadas, marcando a resposta com “Sim” ou “Não”, conforme análise do projeto estudado.

Para a aplicação das perguntas, os conjuntos foram divididos em blocos utilizando os conceitos de classificação das fases do ciclo de vida do desenvolvimento de um projeto de P&D, ou seja, foi feita a divisão baseada em Pesquisa Básica, Pesquisa Aplicada, Desenvolvimento Experimental, Industrialização e Produção e Comercialização. Esses blocos também passaram

por uma classificação, onde foram divididos conforme a escala, sendo estas Escala Teórica, Escala Laboratorial, Escala Piloto e Escala Real.

Para a caracterização das escalas em cada fase de desenvolvimento do projeto, utilizou-se como referência teórica os conceitos aplicados pela ABGI Brasil (2021) e o Guia de TRA do Departamento de Energia dos Estados Unidos, onde há a correlação da escala, fidelidade do sistema e ambiente operacional.

Ressalta-se que existe uma coluna onde identifica-se a pergunta como pertencente ao processo documental, de manufatura ou de tecnologia, sinalizados por D, M e T, respectivamente. Os processos caracterizados por documentais dizem respeito às ações relacionadas aos relatórios, planejamentos de custo, cronograma e escopo, pesquisa de legislação e validações. Os processos de manufatura começam a aparecer no terceiro nível de maturidade, onde já se trata de um ambiente laboratorial para análise e testes, e se referem aos procedimentos e materiais de fabricação, análise de qualidade, validação de segurança e produção. Por fim, os processos de tecnologia estão relacionados às atividades que envolvem a tecnologia em si, ou seja, testes de maturidade, validações de equipamentos, integrações, análise de cenários e técnica.

Cada conjunto de perguntas referentes aos TRL possui questões relacionadas aos elementos que compõe a tecnologia, integrando tanto as perguntas pertinentes aos elementos individualmente, como as voltadas aos aspectos gerais de definição de maturidade tecnológica em um projeto de PD&I. Para responder ao questionário, o avaliador deve preencher o local indicado, determinando se foi ou não validada a atividade.

Para o bloco correspondente ao TRL 1, as perguntas foram formuladas de modo que buscam atender aos requisitos de princípios básicos, visto que se encontra em fase de Pesquisa Básica. Assim sendo, as questões foram desenvolvidas relacionando os aspectos legais, análise inicial de riscos, agentes potenciais e revisão de literatura, conforme Figura 20.

Figura 20 - Bloco de perguntas para TRL 1.

PESQUISA BÁSICA		
TRL 1		
T	Sim	Foram identificados os princípios básicos?
D	Sim	Observações científicas iniciais foram documentadas em relatórios técnicos?
T	Sim	Foram identificadas as possíveis aplicações para a tecnologia?
D	Sim	Foram documentadas as possíveis aplicações da tecnologia?
D	Sim	Foram identificadas alguma lei ou norma relativas à tecnologia que poderia impedir o desenvolvimento do projeto?
D	Sim	Foi documentado se existe alguma outra instituição de pesquisa ou empresa que está pesquisando a tecnologia no país de execução do projeto?
T	Sim	Foi levantada e documentada a ideia inicial de riscos, custos e cronograma para o desenvolvimento da tecnologia?
T	Sim	Foram identificados e documentados possíveis stakeholders para patrocínio?
T	Sim	Foram identificadas e documentadas possíveis fontes de financiamento governamentais para a execução do projeto?
T	Sim	Foram identificados e documentados possíveis parceiros para a execução do projeto (ICTs, startups)?
T	Sim	Foi levantada qual instituição realizará as pesquisas e onde essas serão realizadas?
D	Sim	Existem publicações científicas a respeito da tecnologia?

Fonte: A Autora (2021).

Para a análise do segundo nível de TRL, nesta fase o projeto se encontra, conforme literatura, em etapa de Pesquisa Aplicada, ou seja, as perguntas devem ser direcionadas aos potenciais aplicações da tecnologia e identificação de partes interessadas. Também, com intuito de manter a sinergia com os conceitos de análise individual dos elementos, foram consideradas perguntas com o objetivo de validar o desenvolvimento dos componentes e subsistemas envolvidos no projeto, conforme Figura 21.

Figura 21 - Bloco de perguntas para TRL 2.

ESCALA TEO		PESQUISA APLICADA	
		TRL 2	
T	Sim	Foram identificadas as principais funções que se espera que a tecnologia desempenhe?	
D	Sim	Foi definidas as possíveis aplicações e documentada a viabilidade destas?	
T	Sim	Foi identificada como factível a aplicação da tecnologia?	
T	Sim	Foi identificada a funcionalidade da tecnologia?	
T	Sim	Foram identificadas tecnologias semelhantes teóricas ou empíricas?	
T	Sim	Foram documentadas as semelhanças e soluções dessas tecnologias (pesquisa de concorrência)?	
D	Sim	Estudos em papel foram validados?	
T	Sim	Foram documentadas as previsões de desempenho de cada elemento da tecnologia?	
T	Sim	Foram identificados o sistema absoluto e os elementos básicos que compõe a tecnologia?	
T	Sim	Foi identificado um cliente para a aplicação?	
T	Sim	O cliente demonstra interesse na aplicação?	
D	Sim	Foram feitos e documentados estudos técnicos robustos para confirmação dos princípios básicos?	
T	Sim	Foram definidas as limitações da tecnologia?	
T	Sim	Foi definida uma abordagem de pesquisa (experimentos e metodologias) para o aprofundamento da tecnologia?	
D	Sim	Foram levantadas as possíveis áreas de risco (custo, funcionalidade, cronograma)?	

Fonte: A Autora (2021).

Nos conjuntos de questões que se referem aos níveis de 3 a 6 da escala TRL, as perguntas buscam compreender à etapa de transição da Pesquisa Aplicada para o Desenvolvimento Experimental. Os conjuntos são aplicados para cada nível, contendo perguntas que averiguam as condições de maturidade da tecnologia para que se alcance determinada escala. As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam as questões referentes aos TRL 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

Figura 22 - Bloco de perguntas para TRL 3.

ESCALA TEO		TRL 3	
D	Sim	Finalizado e documentado o projeto conceitual?	
T	Sim	Foi verificada a viabilidade da aplicação através de simulação?	
T	Sim	Foi determinado o desempenho preliminar do sistema?	
T	Sim	Foram especificados e documentados os requisitos de desempenho da tecnologia?	
T	Sim	Foi realizada a visão sistêmica do projeto (elementos que devem estar integrados)?	
M	Sim	Foram identificados os processos chave para execução do projeto?	
T	Sim	Foi demonstrada e validada completamente a viabilidade científica da tecnologia?	
T	Sim	Foram identificadas as técnicas de desenvolvimento da tecnologia?	
M	Sim	Foram avaliados os conceitos de fabricação da tecnologia?	
M	Sim	Foram identificados elementos que compõe a tecnologia e a viabilidade desses?	
D	Sim	Foram determinados os representantes dos envolvidos responsáveis por integrar a equipe do projeto?	
D	Sim	Foram levantados, junto ao cliente, os requisitos e objetivos com o projeto?	
D	Sim	Foram estabelecidas métricas de desempenho para o sistema?	
D	Sim	Foi documentada a ideia dos riscos, custos e cronograma para desenvolvimento do protótipo?	
T	Sim	Foram iniciados estudos de escalabilidade para o projeto?	
M	Sim	Foram avaliados os conceitos de manufatura para o projeto?	
D	Sim	Foram definidas estratégias de mitigação de riscos?	
T	Sim	Foram testados os componentes em escala laboratorial?	
T	Sim	Foram testados os subsistemas da tecnologia em escala laboratorial?	

Fonte: A Autora (2021).

Figura 23 - Bloco de perguntas para TRL 4.

TRL 4		
ESCALA LABORATORIAL	D Sim	Foram testados os componentes individuais em laboratórios e realizados relatórios?
	D Sim	Foram identificados e documentados os requisitos gerais do sistema?
	D Sim	Foi finalizado, avaliado e validado o projeto conceitual da tecnologia?
	D Sim	Foram identificados os custos para desenvolvimento do protótipo?
	D Sim	Foi realizado o cronograma para desenvolvimento do protótipo?
	D Sim	Foram completamente executadas todas as avaliações de riscos envolvidas no projeto?
	D Sim	Foi dado início ao programa de gestão e mitigação de riscos do protótipo?
	T Sim	Foram iniciados os estudos de integração dos componentes da tecnologia ao projeto final?
	T Sim	Componentes individuais testados em laboratório?
	T Sim	Componentes foram montados em subsistemas?
	T Sim	Os subsistemas da tecnologia foram testados em escala laboratorial através de simuladores?
	T Sim	Foram simuladas as interfaces e integrações entre componentes?
	D Sim	Métricas de desempenho do sistema formalmente documentadas e validadas?
	T Sim	A tecnologia demonstra o básico de funcionalidade em ambiente simulado?
	D Sim	Foram realizados a descrição do sistema e os diagramas de fluxo de processos?
	D Sim	Foram identificados os principais geradores de custos iniciais?
	M Sim	Foram identificados os principais processos de fabricação para a tecnologia?
	T Sim	Foi realizada a descrição do processo funcional?
	T Sim	Testes em escala de laboratório e parte dos resíduos reais foram concluídos?
	T Sim	Os testes laboratoriais indicam que os subsistemas satisfazem o desempenho esperado e sua função crítica?

Fonte: A Autora (2021).

Figura 24 - Bloco de perguntas para TRL 5.

TRL 5	
T Sim	Foram levantados os requisitos iniciais de desempenho em ambiente relevante?
T Sim	Foi realizado o projeto preliminar do elemento com modelos para a verificação funções críticas?
T Sim	Foram realizados e documentados os testes de teste placa de ensaio?
T Sim	Foi definida a placa de ensaio para a verificação da função crítica?
D Sim	Foi formulado o plano de teste da função crítica para análise dos efeitos em escala?
T Sim	A relação entre sistema e subsistemas foram compreendidos em uma escala laboratorial?
T Sim	Requisitos da interface do sistema foi identificada (como seria o sistema integrado)?
M Sim	Foi iniciada a engenharia de projeto preliminar?
T Sim	Protótipos de sistema de componentes foram criados?
T Sim	Integração laboratorial de alta fidelidade do sistema concluído, pronto para teste em ambientes relevante?
T Sim	Sistema semelhante testado com variedade de simuladores?
M Sim	Desenhos tridimensionais e em escala de engenharia foi realizado?
M Sim	Foi feitas as modificações necessárias para aproximar o ambiente laboratorial do ambiente operacional?
M Sim	O ambiente agora está mais apto a testes em escala relevante (bancada)?
T Sim	Foram analisados os efeitos de possíveis falhas da tecnologia?
D Sim	Plano de gerenciamento de risco documentado?
T Sim	Foram realizados testes dos componentes em ambiente relevante?
T Sim	Foram realizados testes dos conjuntos em ambiente relevante?

Fonte: A Autora (2021).

Figura 25 - Bloco de perguntas para TRL 6.

TRL 6		
ESCALA PILOTO	D Sim	Foi realizada e documentada os requisitos de desempenho do ambiente relevante?
	D Sim	Foram documentados os requisitos completos de sistema e subsistema para funcionamento?
	D Sim	Foram realizadas e documentadas em relatório as análises das funções críticas?
	T Sim	As relações entre o sistema e subsistemas foram compreendidos em escala de engenharia e possui flexibilidade para variações de processo/design?
	T Sim	Desenho de projeto para o sistema final da planta está completo?
	T Sim	O ambiente operacional determinado para o sistema final já é conhecido?
	M Sim	Análise dos dados de manutenção real, confiabilidade e suporte foi iniciado?
	D Sim	Foram concluídas as linhas de base de custo total do projeto, cronograma e escopo?
	T Sim	Foram determinados os limites operacionais para cada um dos componentes?
	T Sim	Integração de componentes demonstrada em escala de engenharia?
	T Sim	Foram identificados e compreendidos quaisquer problemas de dimensionamento que pudessem estar em aberto?
	T Sim	Foi confirmada a disponibilidade da tecnologia na data estipulada em cronograma?
	M Sim	Processos de fabricação críticos foram prototipados?
	M Sim	Hardware de pré-produção está, em sua maioria, disponível para apoiar a fabricação do sistema?
	T Sim	Foi determinada a viabilidade de engenharia de forma completa (definido que a tecnologia funciona)?
	M Sim	Foram estabelecidos e validados os materiais, processo, design e métodos de integração?
	T Sim	Os elementos que compõe a tecnologia são funcionalmente compatíveis com sistema operacional?
	T Sim	O protótipo é funcional e possui alta fidelidade de sistema operacional (coincide com aplicação final em quase todos os aspectos)?
	T Sim	Demonstrações de integração foi concluída (desenvolvimento de sistema teste)?
	D Sim	Foi finalizado o Relatório Técnico Final da tecnologia?
D Sim	Os riscos e problemas foram identificados e mitigados?	
T Sim	As demonstrações de produção foram validadas?	

Fonte: A Autora (2021).

O sétimo e oitavo conjunto de questões dizem respeito à fase de Industrialização, contendo os TRL 7 e 8, com perguntas que buscam validar as condições para que a tecnologia avaliada se enquadre nesse valor da escala. As questões envolvem aspectos relacionados à documentação das fases anteriores, às análises de risco de custo e cronograma e às validações de escalabilidade relevante e operacional, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Bloco de perguntas para TRL 7 e 8.

		TRL 7	
ESCALA REAL	T	Sim	Foram realizados testes em cada interface do sistema?
	T	Sim	Protótipo em escala completa com forma pronta e função desenvolvida?
	T	Sim	Foi realizada simulação das funcionalidades em ambiente operacional?
	T	Sim	Foi realizada a integração completa do protótipo ao ambiente operacional por simulação?
	T	Sim	Protótipo em escala real demonstrado em um ambiente relevante com fidelidade similar ao sistema completo?
	T	Sim	Foram realizados teste com sucesso do protótipo do sistema em um ambiente relevante?
	D	Sim	Foram documentados em relatório o êxito dos testes do protótipo?
	D	Sim	Foram revisados e documentados os riscos, custo e cronograma para desenvolvimento da tecnologia em escala operacional?
	D	Sim	Foi definido, documentada e aprovado o ambiente operacional?
	T	Sim	O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?
			TRL 8
	T	Sim	Modelo final do sistema completamente construído (produto)?
	T	Sim	Foram realizados ajustes das componentes a suas funções para deixar compatível com o sistema operacional?
	T	Sim	O sistema foi testado e alcançou os requisitos de funcionalidade pretendidos?
	D	Sim	Foram validados e documentados os resultados e funcionamento da tecnologia?
	T	Sim	O subsistema foi qualificado e validado em testes e demonstrações em ambiente operacional com escala limitada?
T	Sim	Funcionalidades foram demonstradas e validadas em ambiente operacional de escala limitada através de teste integrados à plataforma real?	
T	Sim	O sistema atende às especificações definidas inicialmente?	
D	Sim	Foram identificados os custos para desenvolvimento da tecnologia em escala operacional completa com fidelidade idêntica ao sistema final ou houve transmissão do conhecimento em parceria com a indústria?	
D	Sim	Foi definido o cronograma para desenvolvimento em escala operacional completa junto a indústria?	
D	Sim	Foi iniciado o programa de gestão de risco em parceria com a indústria para planejamento prévio de lançamento de mercado?	
D	Sim	Documentação formal de regulamentação está concluída?	
D	Sim	Foi concluída a documentação de continuidade e controle para aumento de escalabilidade?	

Fonte: A Autora (2021).

Por fim, o último conjunto de perguntas diz respeito ao maior TRL a ser alcançado dentro da escala de maturidade, ou seja, o projeto se encontra em fase de comercialização. As perguntas buscam validar as ações junto à indústria, documentações, registros de patentes e elaboração de planos de negócios para o desenvolvimento da tecnologia, conforme a Figura 27.

Figura 27 - Bloco de perguntas para TRL 9.

		TRL 9
T	Sim	Foi demonstrado o sistema real de forma completa?
T	Sim	Conceito operacional implementado com sucesso?
T	Sim	Tecnologia foi integrada plenamente à plataforma de sistema destinado?
T	Sim	Foi comprovada a funcionalidade em escala real, completa e com fidelidade idêntica ao sistema real?
M	Sim	Foram realizados todos os processos de fabricação controlados para o nível de qualidade adequado?
M	Sim	Validado nível de qualidade e segurança do projeto para escala real e completa?
D	Sim	Foi incluída a documentação com todo o processo de desenvolvimento em escala, o custo e o cronograma para lançamento em mercado?
D	Sim	Foi realizado comissionamento na fase de operação?
D	Sim	Foram finalizados os relatórios de operação?
D	Sim	Foi documentado o processo de parceria e de transferência de conhecimento para indústria?
D	Sim	Foi desenvolvido um plano de negócio para desenvolvimento da tecnologia?
D	Sim	Foram realizadas publicações científicas respeito da tecnologia?
D	Sim	Foram registradas patentes?
T	Sim	Foi validada a flexibilidade do projeto para reprodução posterior?
T	Sim	O subsistema encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?
T	Sim	O sistema geral em ambiente de escala operacional real foi operado com 100% de êxito?

Fonte: A Autora (2021).

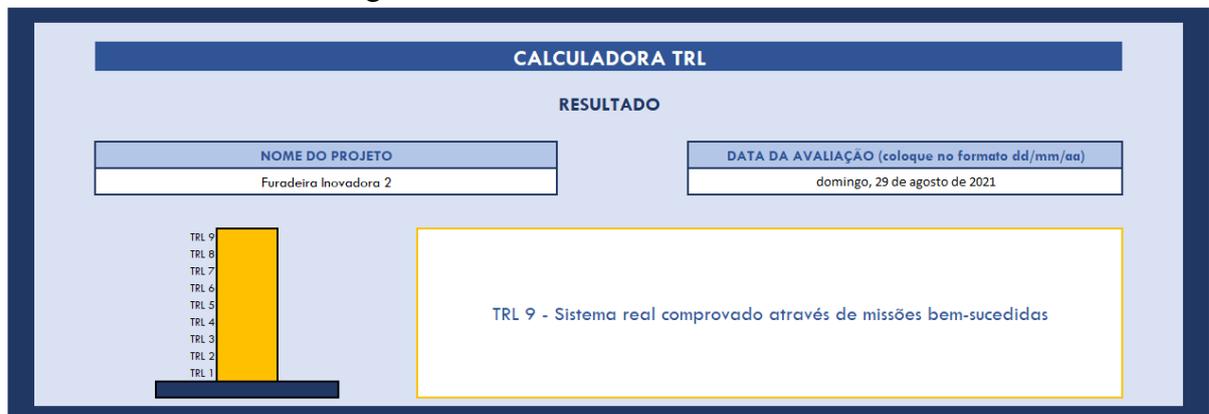
Após finalizar as questões, determinando “Sim” ou “Não” para cada uma, então, o usuário clica no local sinalizado para indicar a conclusão, assim, o modelo o encaminhará para a página de resultados.

3.3.2. Resultado apresentado no modelo

Quando finalizada a etapa de avaliação, onde o avaliador preenche o conjunto de questões com base na análise da tecnologia estudada, o modelo o encaminha para a tela de resultados.

A ordem lógica que o modelo utiliza analisa as respostas dadas pelo usuário na etapa anterior, sendo que a tecnologia apenas alcança determinado TRL se todas as questões pertinentes ao nível tenham tido resposta afirmativa. Caso alguma dessas questões tenha sido respondida com “Não”, então, o nível de TRL determina corresponde ao valor anterior, até que todas as atividades tenham sido executadas e uma nova avaliação tenha sido feita. A tela de exibição da ferramenta está representada pela Figura 28.

Figura 28 - Tela de resultados do modelo.



Fonte: A Autora (2021).

4. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO MODELO

Para a avaliação do modelo proposto, realizou-se uma pesquisa em uma empresa que atua na área de inovação aberta. Inicialmente, foi realizada uma apresentação da ferramenta desenvolvida em Excel a dois membros da empresa em questão, especificando as instruções de uso e os objetivos que se desejou alcançar com a proposição desta metodologia.

Ambos os envolvidos utilizaram a ferramenta para simulação de avaliação do TRL de um projeto de escolha própria, para análise da efetividade e comparação de resultados. A proposta avaliativa foi de que simulassem uma avaliação em um projeto e posteriormente respondessem a um questionário referente a aplicação do modelo.

Na primeira avaliação, foram identificados quatro elementos críticos dentre os componentes apresentados após a execução da etapa de definição das CTE. Na etapa de avaliação do TRL, foram determinadas como afirmativas todas as perguntas referentes aos TRL de 1 a 5, sendo que o nível 6, apesar de constar a maioria de respostas afirmativas, obteve respostas negativas em alguns itens, conforme a Figura 29.

Figura 29 - Avaliação 1.

TRL 6		
D	Sim	Foi realizada e documentada os requisitos de desempenho do ambiente relevante?
D	Sim	Foram documentados os requisitos completos de sistema e subsistema para funcionamento?
D	Sim	Foram realizadas e documentadas em relatório as análises das funções críticas?
T	Sim	As relações entre o sistema e subsistemas foram compreendidos em escala de engenharia e possui flexibilidade para variações de processo/design?
T	Não	Desenho de projeto para o sistema final da planta está completo?
T	Sim	O ambiente operacional determinado para o sistema final já é conhecido?
M	Sim	Análise dos dados de manutenção real, confiabilidade e suporte foi iniciado?
D	Sim	Foram concluídas as linhas de base de custo total do projeto, cronograma e escopo?
T	Não	Foram determinados os limites operacionais para cada um dos componentes?
T	Sim	Integração de componentes demonstrada em escala de engenharia?
T	Sim	Foram identificados e compreendidos quaisquer problemas de dimensionamento que pudessem estar em aberto?
T	Sim	Foi confirmada a disponibilidade da tecnologia na data estipulada em cronograma?
M	Não	Processos de fabricação críticos foram prototipados?
M	Sim	Hardware de pré-produção está, em sua maioria, disponível para apoiar a fabricação do sistema?
T	Sim	Foi determinada a viabilidade de engenharia de forma completa (definido que a tecnologia funciona)?
M	Não	Foram estabelecidos e validados os materiais, processo, design e métodos de integração?
T	Sim	Os elementos que compõe a tecnologia são funcionalmente compatíveis com sistema operacional?
T	Sim	O protótipo é funcional e possui alta fidelidade de sistema operacional (coincide com aplicação final em quase todos os aspectos)?
T	Sim	Demonstrações de integração foi concluída (desenvolvimento de sistema teste)?
D	Sim	Foi finalizado o Relatório Técnico Final da tecnologia?
D	Sim	Os riscos e problemas foram identificados e mitigados?
T	Sim	As demonstrações de produção foram validadas?

Fonte: A Autora (2021).

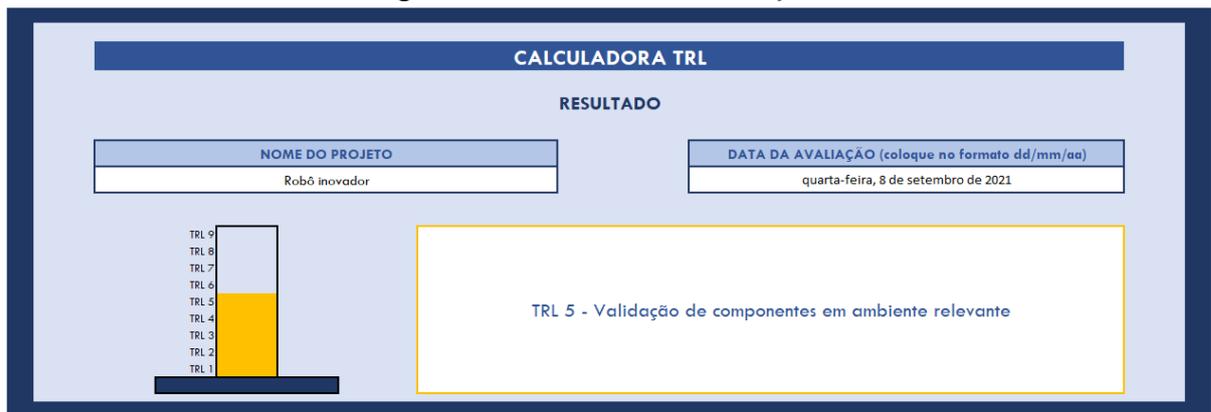
No bloco de perguntas referente ao TRL 6, duas questões de tecnologia e duas questões de manufatura obtiveram “Não” como resposta, sendo essas, respectivamente:

- Desenho de projeto para o sistema final da planta está completo?
- Foram determinados os limites operacionais para cada um dos componentes?
- Processos de fabricação críticos foram prototipados?

- Foram estabelecidos e validados os materiais, processo, design e métodos de integração?

Assim sendo, levando-se em consideração que o modelo parte do princípio que, para alcançar determinado nível de maturidade, se faz necessário que todo o bloco de perguntas tenha respostas afirmativas, o resultado da primeira avaliação chegou à conclusão de TRL 5, como mostra a Figura 30.

Figura 30 - Resultado da avaliação 1.



Fonte: A Autora (2021).

Na segunda avaliação realizada, foi identificado um elemento crítico dentre os componentes apresentados na fase de definição das CTE. Neste caso, diferente da primeira avaliação, onde houve uma constante de afirmativas nas respostas dos blocos anteriores ao de TRL definido, o projeto em avaliação obteve respostas negativas em etapas anteriores àquele.

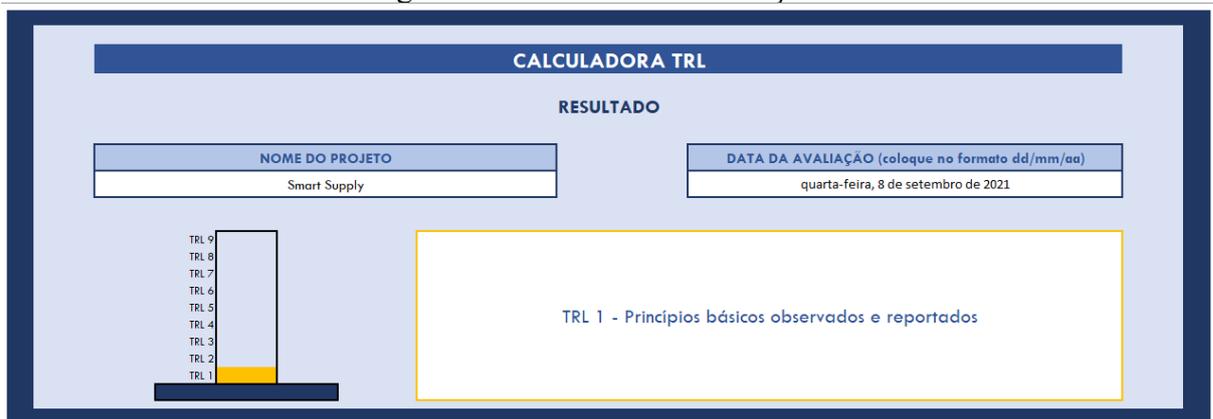
Nessa avaliação, apesar de os blocos referentes aos TRL 1, 3 e 4 terem alcançado respostas afirmativas em todas suas questões, no bloco de TRL 2, cinco questões foram qualificadas como negativas, sendo essas:

- O cliente demonstra interesse na aplicação?
- Foram feitos e documentados estudos técnicos robustos para confirmação dos princípios básicos?
- Foram definidas as limitações da tecnologia?
- Foi definida uma abordagem de pesquisa (experimentos e metodologias) para o aprofundamento da tecnologia?
- Foram levantadas as possíveis áreas de risco (custo, funcionalidade, cronograma)?

Como o modelo proposto leva em consideração que para alcançar o TRL 2 o projeto deveria atender a todos os requisitos desse nível, e para alcançar o terceiro nível de maturidade,

o projeto deveria atender a todos os requisitos do TRL 2 e 3, apesar de os níveis subsequentes a esse, até o quarto nível, terem todas as perguntas com resposta “Sim”, o resultado da avaliação retornou a maturidade tecnológica do projeto avaliada em TRL 1. A Figura 31 mostra a tela resultante da segunda avaliação.

Figura 31 - Resultado da avaliação 2.



Fonte: A Autora (2021).

Após a aplicação do modelo em duas simulações de projetos de inovação da empresa, os envolvidos responderam ao formulário avaliativo que busca compreender a visão do usuário no que tange à usabilidade da ferramenta.

Para a atribuição de notas e avaliação de resultados, foi utilizado um formulário, disponibilizado para cada um dos membros, criado através da plataforma *Google Forms* (Apêndice A), onde foram formuladas questões referentes ao modelo e à aplicação da ferramenta, as quais estão expostas no Quadro 11.

Quadro 11 - Perguntas do formulário avaliativo.

Sessão	Questão
Avaliação da interface do modelo	Avalie a interface do modelo.
	Avalie a tela inicial do modelo.
	Avaliando a aba de acesso às informações de "Conceitos e Definição":
	Avaliando a aba de acesso às informações de "Instruções de Uso":
	Avalie o software de desenvolvimento do modelo (Excel):
	Você preferiria que o modelo fosse desenvolvido em uma plataforma (software) próprio?

Continua.

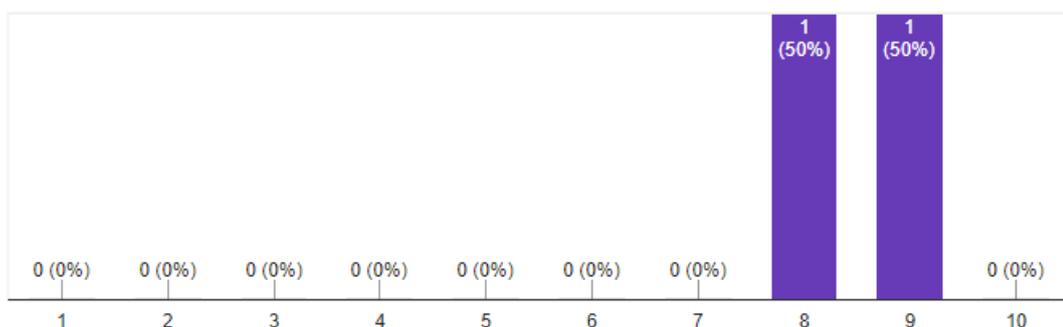
Sessão	Questão
Avaliação da etapa de definição de CTE	Qual sua avaliação quanto à determinação de elementos críticos antes da realização da avaliação do TRL em si?
	Você acredita que definir os CTE do projeto evita que surjam impedimentos no avanço de TRL posteriormente?
	Como você avalia as perguntas utilizadas para a classificação dos elementos quanto a criticidade?
Avaliação da etapa de avaliação do TRL	Qual a efetividade de aplicação para desenvolvimento de produtos?
	Sobre as questões nos blocos de TRL, quão efetivas você as considera na determinação do TRL 1/ 2/ 3/ 4/ 5/ 6/ 7/ 8/ 9?
	Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 1/ 2/ 3/ 4/ 5/ 6/ 7/ 8/ 9? Quais?
	Avalie a tela de resultados da avaliação de TRL.

Fonte: A Autora (2021).

No quesito design da interface, para a avaliação da tela inicial, foi disponibilizada uma atribuição em escala, variando de 1 a 10, e obteve-se como resposta as notas 8 e 10. Já às abas que se referem às instruções de uso e aos conceitos e definições foram atribuídas notas que variam entre 4 e 5, em uma escala de 1 a 5. A importância da avaliação desse parâmetro se dá para compreensão da clareza das instruções e da qualidade do conteúdo disponibilizado caso seja de necessidade do usuário a utilização destes.

Quanto à avaliação da etapa de definição dos CTE, em uma escala variando entre superficial (equivalente à nota 1) e completo (equivalente à nota 9), ao bloco de questões referente a criticidade dos elementos que compõe a tecnologia foram atribuídas as notas 8 e 9, conforme representado pelo gráfico que consta na Figura 32.

Figura 32 - Avaliação da etapa de definição de CTE.



Fonte: A Autora (2021).

Ambos avaliadores concordaram que a definição dos CTE do projeto evita que surjam impedimentos no avanço de TRL posteriormente, sendo assim, pode-se dizer que a

identificação dos elementos críticos é de suma importância em projetos de produto, devido ao fato de que apenas com o pleno funcionamento e avanço tecnológico destes, o projeto se encontrará apto a avançar seu nível de maturidade conforme a escala de TRL.

Para a análise de eficiência da etapa de avaliação do TRL, onde foram disponibilizados os blocos de questões de cada nível da escala de maturidade, disponibilizou-se no formulário uma escala variando entre “Muito pouco e Muito eficiente”, onde os resultados apresentaram mesma nota atribuída por ambos os avaliadores até o TRL 4, conforme mostra a Figura 33.

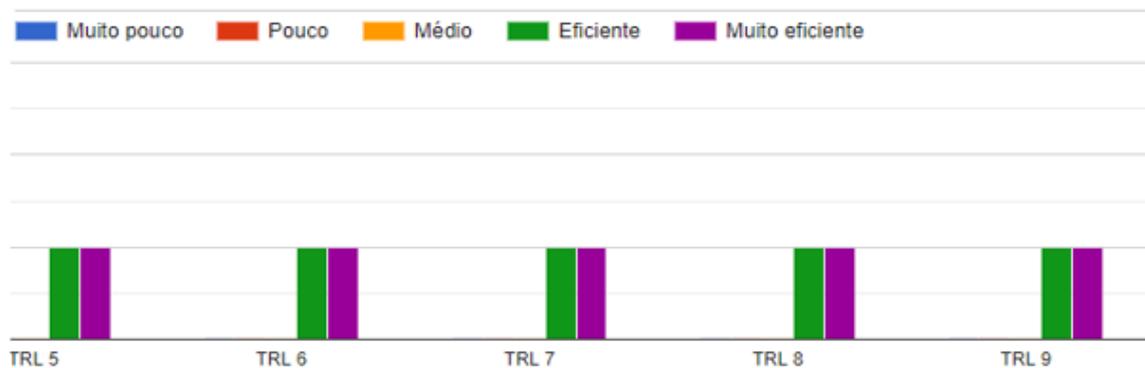
Figura 33 - Avaliação das perguntas referentes aos TRL 1, 2, 3 e 4.



Fonte: A Autora (2021).

Já as notas para as questões referentes aos níveis 5, 6, 7, 8 e 9 da escala de maturidade tiveram divergência, tendo variado entre “Eficiente” e “Muito eficiente”, conforme o que mostra os gráficos contidos na Figura 34. Comentários adicionais à avaliação em escala mostram que em determinadas perguntas, podendo estas ser de qualquer nível, há a necessidade de exemplos para melhor entendimento do que está sendo questionado.

Figura 34 - Avaliação das perguntas referentes aos TRL 5, 6, 7, 8 e 9.



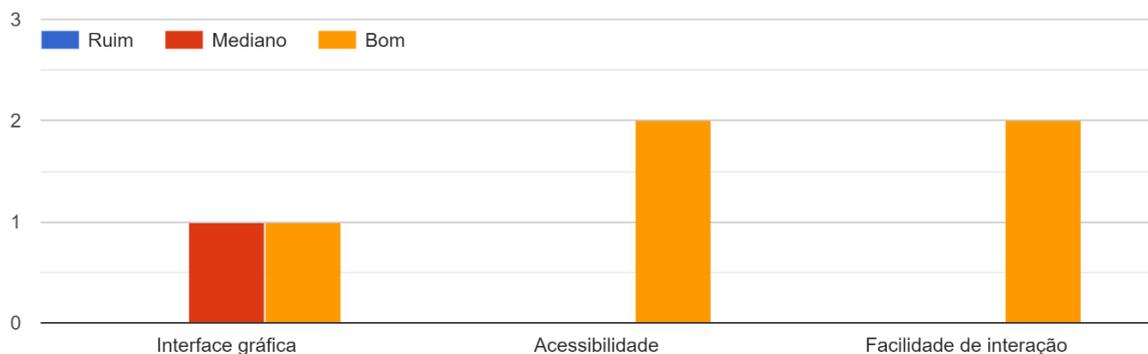
Fonte: A Autora (2021).

No que tange aos projetos de produto, com objetivo de obter um resultado mais amplo, propôs-se uma avaliação geral da eficiência do uso do modelo para tecnologias que resultassem

em produtos. A esse parâmetro foram atribuídas as notas 8 e 9, em uma escala que variou de 1 a 10.

Para a avaliação do Excel como software utilizado para a formulação do modelo utilizou-se uma escala de três níveis, sendo esses ruim, mediano e bom. Quanto à acessibilidade e a facilidade de interação, o software apresentado alcançou nível bom para ambos os parâmetros. Já na avaliação da qualidade deste no que tange à interface gráfica, houve divergência na concessão da nota, tendo tido uma atribuição com “mediano” e outra com qualificação de “bom”, conforme mostra a Figura 35.

Figura 35 - Avaliação do software utilizado para desenvolvimento do modelo.



Fonte: A Autora (2021).

Por fim, avaliou-se a tela de resultados do modelo, onde são disponibilizadas uma escala de TRL a ser preenchida conforme resultado da avaliação feita, e uma caixa de texto contendo uma breve descrição da característica do TRL resultante. No formulário foi disposta uma escala variando de 1 a 10, equivalente às qualidades “Ruim e superficial” e “Muito boa e claro”, respectivamente. A esse parâmetro de análise foram-se atribuídas as notas 9 e 10.

No geral, o modelo apresentou resultados satisfatórios, com retorno de que, com determinados ajustes, tanto no que diz respeito à interface e software, quanto em relação à metodologia, ele possa vir a ser uma saída eficiente para avaliação de projetos de inovação nas empresas.

5. CONCLUSÃO

Partindo-se do fundamento de que, apesar de se enquadrar como uma ciência em constante evolução em escala mundial, a compreensão acerca do desenvolvimento de projetos de inovação no Brasil ainda se encontra em uma área pouco explorada no ramo empresarial. Assim sendo, o progresso deste trabalho deu-se pela necessidade de ampliar o conhecimento voltado à área de PD&I, principalmente no que tange à avaliação da maturidade tecnológica de tecnologias em desenvolvimento.

Como primeiro e segundo objetivo específico, buscou-se compreender o uso da escala de TRL e identificar modelos e ferramentas utilizadas nos dias atuais, de forma a escutar os conceitos empregados a estes. Para isso, levantou-se na bibliografia quatro diferentes modelos, analisando os parâmetros utilizados como critério avaliativo para cada um e as aplicações usuais a qual cada um se refere. Pode-se notar as particularidades das ferramentas quanto à aplicabilidade, sendo que algumas apresentam questões, muitas vezes, excessivamente específicas para um determinado setor, ou carecem de detalhamento nas questões aplicadas em cada TRL.

O segundo objetivo específico se caracterizou pela proposição de um modelo para avaliação da maturidade tecnológica em projetos de PD&I, sendo, posteriormente, avaliado em uma empresa de mesmo segmento. Pode-se dizer que a determinação dos CTE, previamente à avaliação de TRL como um todo, permite uma maior assertividade no que diz respeito à definição da maturidade tecnológica do projeto, assim, pode-se traçar planos de ações para que, em etapas avançadas, a tecnologia não se depare com impeditivos de avanço de TRL.

Quanto aos aspectos negativos levantados nas considerações relativas a cada um dos modelos estudados na revisão bibliográfica, conforme citados na subseção 2.4, buscou-se, com o desenvolvimento do modelo proposto, mitigar os possíveis pontos negativos das ferramentas analisadas. Assim sendo, as perguntas referentes a cada TRL foram formuladas com o objetivo de se obter maior detalhamento no que tange a cada nível de TRL, de forma que a caracterizar as questões de cada bloco conforme seu tipo de processo, além da consideração dos elementos críticos para a formulação destas.

Ainda no que diz respeito aos aspectos negativos dos modelos levantados, com o objetivo de retificar as adversidades quanto à intuição dos modelos estudados, buscou-se desenvolver o modelo de forma que este pudesse se caracterizar por ser intuitivo, com uma interface organizada e agradável, adequando a ferramenta de maneira que um usuário sem

experiência prévia com o modelo tenha aptidão a usá-lo. O modelo se mostrou intuitivo no que tange à usabilidade e à interface, sendo ainda necessárias algumas adequações nas perguntas referentes à cada bloco de nível de TRL, para que o avaliador tenha mais clareza nas perguntas e maior objetividade em suas respostas.

Ressalta-se a importância de manter a avaliação TRL sempre concomitante aos elementos de alta criticidade, de forma que o modelo proposto buscou unir as perguntas voltadas às considerações gerais de maturidade, apresentando detalhamento nos aspectos tecnológicos, de manufatura e documentais, às avaliações específicas referentes aos subsistemas e componentes que integram a tecnologia a ser avaliada.

Como recomendação para futuros trabalhos, sugere-se a realização de ajustes na interface, buscando a realização de uma pesquisa para compreensão da melhor ferramenta a ser utilizada para o desenvolvimento de um modelo TRL. Por fim, sugere-se que seja feito um maior detalhamento quanto à metodologia no que tange às perguntas específicas de cada TRL, buscando oferecer uma melhor compreensão e, assim, uma maior objetividade nas respostas dos usuários avaliadores.

REFERÊNCIAS

- ABGI BRASIL. **TRL: recursos financeiros por níveis de maturidade tecnológica.** [S.l.] 2021. Disponível em: <https://brasil.abgi-group.com/radar-inovacao/artigos-estudos/trl-recursos-financeiros-por-niveis-de-maturidade-tecnologica/>. Acesso em: 22 abr. 2021.
- AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **Manual de uso da ferramenta IMATEC.** 2018. Disponível em: <https://imatec.aeb.gov.br/resources/img/manual/manual.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- ALMEIDA, V. R. D. **Sensores inerciais fotônicos para aplicações aeroespaciais: nível de maturidade tecnológica.** 2008. Monografia (Curso de Comando e Estado-Maior) - Divisão de Ensino, Escola de Comando e Estado-Maior da Aeronáutica, Rio de Janeiro, 2008.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Recommended Practice on Subsea Equipment Qualification: API Recommended Practice 17Q.** 2018. Disponível em: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=API%20RP%2017Q&item_s_key=00554660#product-details-list. Acesso em: 30 jun. 2021.
- DE JESUS, G. T. **Avaliação da maturidade de integração entre elementos tecnológicos a partir de visões de arquitetura de sistemas espaciais.** 2019. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.
- GIL, L.; ANDRADE, M.H.; COSTA, M.C. Os TRL (Technology Readiness Levels) como ferramenta na avaliação tecnológica. **Revista Ingenium.** Funchal, n. 139, p. 94-96, jan./fev., 2014.
- GOVERNMENT OF CANADA. **Clean Technology Data Strategy. 2020.** Disponível em: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/099.nsf/vwapj/TRL-e.pdf/\\$file/TRL-e.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/099.nsf/vwapj/TRL-e.pdf/$file/TRL-e.pdf). Acesso em: 28 jul. 2021.
- LEÃO, C. et al. **Fomento à inovação: da ideia ao recurso.** 1. ed. São Paulo: Editora Pillares, 2017.
- MANKINS, J. C. **Technology Readiness Level: a white paper.** 2004. Disponível em: [file:///C:/Users/gabiv/OneDrive/Documentos/TCC/TechnologyReadinessLevels_AWhitePaper_1995-Edited_2004%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/gabiv/OneDrive/Documentos/TCC/TechnologyReadinessLevels_AWhitePaper_1995-Edited_2004%20(1).pdf). Acesso em: 13 abr. 2021.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Systems engineering handbook.** 2007. Disponível em: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_systems_engineering_handbook.pdf. Acesso em: 24 abr. 2021.
- OLECHOWSKI, A.; EPPINGER, S. D.; JOGLEKAR, N. **Technology Readiness Levels: a study of state-of-the-art use challenges, and opportunities.** MIT Sloan School of Management, MIT Sloan School Working Paper 5127- 15. 2015. Disponível em: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/96307/MITSloanWP5127-15_Eppinger_PICMET.pdf?sequence=1. Acesso em: 15 jul. 2015.

QUINTELLA, C. M. et al. **Prospecção tecnológica**. Salvador: FORTEC/PROFNIT, 2019.
SILVA NETO, A. M.; TRABASSO, L. G. **Método para avaliação do grau de maturidade tecnológica no processo de desenvolvimento de produtos da indústria metal-mecânica**. 2015. Disponível em: http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/334/322. Acesso em: 13 abr. 2021.

TZINIS, I. **Technology Readiness Level**. NASA. [S.l.] 2021. Disponível em: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level. Acesso em: 18 abr. 2021.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY: OFFICE OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. **Standard Review Plan (SRP): Technology Readiness Assessment Report**. 2010. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/em/Volume_I/O_SRP.pdf. Acesso em: 28 jul. 2021.

U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. **Technology readiness assessment guide: best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects**. 2020. Disponível em: <https://www.gao.gov/assets/gao-20-48g.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2021.

VALENTE, M. **Como avaliar a maturidade tecnológica no desenvolvimento do seu produto: technology readiness assessment**. 2020. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/tra-desenvolvimento-de-produto/>. Acesso em: 30 jun. 2021.

XAVIER JR; A. et al. **AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity: IMATEC**. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jatm/a/L6KRCWrVw5v5ySWN5h738Nv/?format=pdf&lang=en/>. Acesso em: 28 jul. 2021.

APÊNDICE A — QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Modelo de avaliação de TRL em projetos de PD&I

Formulário a ser preenchido para avaliação do modelo proposto para avaliação do TRL de tecnologias a serem desenvolvidas em projetos de PD&I.

***Obrigatório**

1. Avalie a interface do modelo. *

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

2. Avalie a tela inicial do modelo. *

Marcar apenas uma oval.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="radio"/>									

3. Avaliando a aba de acesso às informações de "Conceitos e Definição": *

Marcar apenas uma oval por linha.

	1	2	3	4	5
Utilidade	<input type="radio"/>				
Clareza	<input type="radio"/>				
Conteúdo	<input type="radio"/>				

4. Avaliando a aba de acesso às informações de "Instruções de Uso": *

Marcar apenas uma oval por linha.

	1	2	3	4	5
Utilidade	<input type="radio"/>				
Clareza	<input type="radio"/>				
Organização	<input type="radio"/>				

5. Avalie o software de desenvolvimento do modelo (Excel): *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Ruim	Mediano	Bom
Interface gráfica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Acessibilidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Facilidade de interação	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

6. Você preferiria que o modelo fosse desenvolvido em uma plataforma (software) próprio? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

7. Qual sua avaliação quanto à determinação de elementos críticos antes da realização da avaliação do TRL em si? *

CALCULADORA TRL

DEFINIÇÃO DE CTE

Sugere-se que nesta etapa seja feita uma revisão abrangente do projeto, analisando minuciosamente a estrutura da tecnologia, para que seja determinado a lista de elementos que compõe a tecnologia a ser avaliada (essa etapa é acessível) para projetos em escala de maturidade que já tenham determinados os elementos que compõe a tecnologia

NÚMERO DE ELEMENTOS:

LISTA DE ELEMENTOS	CRÍTICO?
1 Base	Não
2 Coluna	Não
3 Mesa	Sim
4 Sistema escrito	
5 Alavanca de movimentação	
6 Arvore de trabalho	

Preencha, inicialmente, o número de elementos que compõe a tecnologia, e, depois, preencha a tabela ao lado com a lista de elementos da tecnologia a ser avaliada.

Realize a avaliação de criticidade através do formulário abaixo da tabela de elementos para cada elemento contido na lista, selecionando na coluna K se esse se enquadra ou não como elemento crítico de tecnologia, conforme o resultado retornado em "criticidade" ao final da avaliação.

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Pouco eficiente Muito eficiente

8. Você acredita que definir os CTE do projeto evita que surjam impedimentos no avanço de TRL posteriormente? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

9. Como você avalia as perguntas utilizadas para a classificação dos elementos quanto a criticidade? *

Elemento	Criticidade: Elemento Crítico
Sim	O elemento é considerado inovador?
Não	O elemento deverá operar de forma diferente do que está operando atualmente ou alcançar desempenho superior ao seu projeto inicial?
Sim	O elemento impacta diretamente o pleno funcionamento da tecnologia absoluta?
Não	O não desenvolvimento do elemento poderia, potencialmente, frear o alcance do TRL 9 futuramente? (Lançamento no mercado)
Sim	Existem limitações quanto ao uso do elemento que podem gerar risco de atraso de cronograma quando necessária a inserção deste no modelo final?
Sim	Existem limitações quanto ao uso do elemento que podem gerar risco de custo quando necessária a inserção deste no modelo final?

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Superficial	<input type="radio"/>	Completo									

10. Qual a efetividade de aplicação para desenvolvimento de produtos? *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pouco	<input type="radio"/>	Muito									

11. Feedbacks sobre a pergunta acima.

12. Sobre as questões nos blocos de TRL, quão efetivas você as considera na determinação do: *

Marcar apenas uma oval por linha.

	Muito pouco	Pouco	Médio	Eficiente	Muito eficiente
TRL 1	<input type="radio"/>				
TRL 2	<input type="radio"/>				
TRL 3	<input type="radio"/>				
TRL 4	<input type="radio"/>				
TRL 5	<input type="radio"/>				
TRL 6	<input type="radio"/>				
TRL 7	<input type="radio"/>				
TRL 8	<input type="radio"/>				
TRL 9	<input type="radio"/>				

13. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 1?
Quais?

TRL 1		
T	Sm	Foram identificados os princípios básicos?
D	Sm	Observações científicas iniciais foram documentadas em relatórios técnicos?
T	Sm	Foram identificadas as possíveis aplicações para a tecnologia?
D	Sm	Foram documentadas as possíveis aplicações da tecnologia?
D	Sm	Foram identificadas alguma lei ou norma relativas à tecnologia que poderia impedir o desenvolvimento do projeto?
D	Sm	Foi documentado se existe alguma outra instituição de pesquisa ou empresa que está pesquisando a tecnologia no país de execução do projeto?
T	Sm	Foi levantada e documentada a ideia inicial de riscos, custos e cronograma para o desenvolvimento da tecnologia?
T	Sm	Foram identificados e documentados possíveis stakeholders para patrocínio?
T	Sm	Foram identificados e documentados possíveis fontes de financiamento governamentais para a execução do projeto?
T	Sm	Foram identificados e documentados possíveis parceiros para a execução do projeto (ICTs, startups)?
T	Sm	Foi levantada qual instituição realizará as pesquisas e onde essas serão realizadas?
D	Sm	Existem publicações científicas a respeito da tecnologia?

14. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 2?
Quais?

TRL 2		
T	Sm	Foram identificadas as principais funções que se espera que a tecnologia desempenhe?
D	Sm	Foi definida as possíveis aplicações e documentada a viabilidade destas?
T	Sm	Foi identificada como factível a aplicação da tecnologia?
T	Sm	Foi identificada a funcionalidade da tecnologia?
T	Sm	Foram identificadas tecnologias semelhantes teóricas ou empíricas?
T	Sm	Foram documentadas as semelhanças e soluções dessas tecnologias (pesquisa de concorrência)?
D	Sm	Estudos em papel foram validados?
T	Sm	Foram documentadas as previsões de desempenho de cada elemento da tecnologia?
T	Sm	Foram identificados o sistema absoluto e os elementos básicos que compõe a tecnologia?
T	Sm	Foi identificado um cliente para a aplicação?
T	Sm	O cliente demonstra interesse na aplicação?
D	Sm	Foram feitos e documentados estudos técnicos robustos para confirmação dos princípios básicos?
T	Sm	Foram definidas as limitações da tecnologia?
T	Sm	Foi definida uma abordagem de pesquisa (experimentos e metodologias) para o aprofundamento da tecnologia?
D	Sm	Foram levantadas as possíveis áreas de risco (custo, funcionalidade, cronograma)?

15. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 3?
Quais?

TRL 3		
D	Sm	Finalizado e documentado o projeto conceitual?
T	Sm	Foi verificada a viabilidade da aplicação através de simulação?
T	Sm	Foi determinado o desempenho preliminar do sistema?
T	Sm	Foram especificados e documentados os requisitos de desempenho da tecnologia?
T	Sm	Foi realizada a visão sistêmica do projeto (elementos que devem estar integrados)?
M	Sm	Foram identificados os processos chave para execução do projeto?
T	Sm	Foi demonstrada e validada completamente a viabilidade científica da tecnologia?
T	Sm	Foram identificadas as técnicas de desenvolvimento da tecnologia?
M	Sm	Foram avaliados os conceitos de fabricação da tecnologia?
M	Sm	Foram identificados elementos que compõe a tecnologia e a viabilidade desses?
D	Sm	Foram determinados os representantes dos envolvidos responsáveis por integrar a equipe do projeto?
D	Sm	Foram levantados, junto ao cliente, os requisitos e objetivos com o projeto?
D	Sm	Foram estabelecidas métricas de desempenho para o sistema?
D	Sm	Foi documentada a ideia dos riscos, custos e cronograma para desenvolvimento do protótipo?
T	Sm	Foram iniciados estudos de escalabilidade para o projeto?
M	Sm	Foram avaliados os conceitos de manufatura para o projeto?
D	Sm	Foram definidas estratégias de mitigação de riscos?
T	Sm	Foram testados os componentes em escala laboratorial?
T	Sm	Foram testados os subsistemas da tecnologia em escala laboratorial?

16. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 4? Quais?

TRL 4		
D	Sim	Foram testados os componentes individuais em laboratório e realizados relatórios?
D	Sim	Foram identificados e documentados os requisitos gerais do sistema?
D	Sim	Foi finalizado, avaliado e validado o projeto conceitual da tecnologia?
D	Sim	Foram identificados os custos para desenvolvimento do protótipo?
D	Sim	Foi realizado o cronograma para desenvolvimento do protótipo?
D	Sim	Foram completamente executadas todas as avaliações de riscos envolvidas no projeto?
D	Sim	Foi dado início ao programa de gestão e mitigação de riscos do protótipo?
T	Sim	Foram iniciados os estudos de integração dos componentes da tecnologia ao projeto final?
T	Sim	Componentes individuais testados em laboratório?
T	Sim	Componentes foram montados em subsistemas?
T	Sim	Os subsistemas da tecnologia foram testados em escala laboratorial através de simuladores?
T	Sim	Foram simuladas as interfaces e integrações entre componentes?
D	Sim	Métricas de desempenho do sistema formalmente documentadas e validadas?
T	Sim	A tecnologia demonstra o básico de funcionalidade em ambiente simulado?
D	Sim	Foram realizados a descrição do sistema e os diagramas de fluxo de processos?
D	Sim	Foram identificados os principais geradores de custos iniciais?
M	Sim	Foram identificados os principais processos de fabricação para a tecnologia?
T	Sim	Foi realizada a descrição do processo funcional?
T	Sim	Testes em escala de laboratório e parte dos resíduos reais foram concluídos?
T	Sim	Os testes laboratoriais indicam que os subsistemas satisfazem o desempenho esperado e sua função crítica?

17. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 5? Quais?

TRL 5		
T	Sim	Foram levantados os requisitos iniciais de desempenho em ambiente relevante?
T	Sim	Foi realizado o projeto preliminar do elemento com modelos para a verificação funções críticas?
T	Sim	Foram realizados e documentados os testes de teste placa de ensaio?
T	Sim	Foi definida a placa de ensaio para a verificação da função crítica?
D	Sim	Foi formulado o plano de teste da função crítica para análise dos efeitos em escala?
T	Sim	A relação entre sistema e subsistemas foram compreendidos em uma escala laboratorial?
T	Sim	Requisitos da interface do sistema foi identificada (como seria o sistema integrado)?
M	Sim	Foi iniciada a engenharia de projeto preliminar?
T	Sim	Protótipos de sistema de componentes foram criados?
T	Sim	Integração laboratorial de alta fidelidade do sistema concluído, pronto para teste em ambientes relevante?
T	Sim	Sistema semelhante testado com variedade de simuladores?
M	Sim	Desenhos tridimensionais e em escala de engenharia foi realizado?
M	Sim	Foi feitas as modificações necessárias para aproximar o ambiente laboratorial do ambiente operacional?
M	Sim	O ambiente agora está mais apto a testes em escala relevante (banca)?
T	Sim	Foram analisados os efeitos de possíveis falhas da tecnologia?
D	Sim	Plano de gerenciamento de risco documentado?
T	Sim	Foram realizados testes dos componentes em ambiente relevante?
T	Sim	Foram realizados testes dos conjuntos em ambiente relevante?

18. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 6? Quais?

TRL 6		
D	Sim	Foi realizada e documentada os requisitos de desempenho do ambiente relevante?
D	Sim	Foram documentados os requisitos completos de sistema e subsistema para funcionamento?
D	Sim	Foram realizadas e documentadas em relatório as análises das funções críticas?
T	Sim	As relações entre o sistema e subsistemas foram compreendidos em escala de engenharia e possui flexibilidade para variações de processo/design?
T	Sim	Desenho do projeto para o sistema final da planta está completo?
T	Sim	O ambiente operacional determinado para o sistema final já é conhecido?
M	Sim	Análise dos dados de manutenção real, confiabilidade e suporte foi iniciado?
D	Sim	Foram concluídas as linhas de base de custo total do projeto, cronograma e escopo?
T	Sim	Foram determinados os limites operacionais para cada um dos componentes?
T	Sim	Integração de componentes demonstrada em escala de engenharia?
T	Sim	Foram identificados e compreendidos quaisquer problemas de dimensionamento que pudessem estar em aberto?
T	Sim	Foi confirmada a disponibilidade da tecnologia na data estipulada em cronograma?
M	Sim	Processos de fabricação críticos foram prototipados?
M	Sim	Hardware de pré-produção está, em sua maioria, disponível para apoiar a fabricação do sistema?
T	Sim	Foi determinada a viabilidade de engenharia de forma completa (definido que a tecnologia funciona)?
M	Sim	Foram estabelecidos e validados os materiais, processo, design e métodos de integração?
T	Sim	Os elementos que compõe a tecnologia são funcionalmente compatíveis com sistema operacional?
T	Sim	O protótipo é funcional e possui alta fidelidade de sistema operacional (coincide com aplicação final em quase todos os aspectos)?
T	Sim	Demonstrações de integração foi concluída (desenvolvimento de sistema teste)?
D	Sim	Foi finalizado o Relatório Técnico Final da tecnologia?
D	Sim	Os riscos e problemas foram identificados e mitigados?
T	Sim	As demonstrações de produção foram validadas?

19. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 7?
Quais?

TRL 7		
T	Sim	Foram realizados testes em cada interface do sistema?
T	Sim	Protótipo em escala completa com forma pronta e função desenvolvida?
T	Sim	Foi realizada simulação das funcionalidades em ambiente operacional?
T	Sim	Foi realizada a integração completa do protótipo ao ambiente operacional por simulação?
T	Sim	Protótipo em escala real demonstrado em um ambiente relevante com fidelidade similar ao sistema completo?
T	Sim	Foram realizados teste com sucesso do protótipo do sistema em um ambiente relevante?
D	Sim	Foram documentados em relatório o êxito dos testes do protótipo?
D	Sim	Foram revisados e documentados os riscos, custo e cronograma para desenvolvimento da tecnologia em escala operacional?
D	Sim	Foi definido, documentada e aprovado o ambiente operacional?
T	Sim	O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?

20. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 8?
Quais?

TRL 8		
T	Sim	Modelo final do sistema completamente construído (produto)?
T	Sim	Foram realizados ajustes das componentes a suas funções para deixar compatível com o sistema operacional?
T	Sim	O sistema foi testado e alcançou os requisitos de funcionalidade pretendidos?
D	Sim	Foram validados e documentados os resultados e funcionamento da tecnologia?
T	Sim	O subsistema foi qualificado e validado em testes e demonstrações em ambiente operacional com escala limitada?
T	Sim	Funcionalidades foram demonstradas e validadas em ambiente operacional de escala limitada através de teste integrados à plataforma real?
T	Sim	O sistema atende às especificações definidas inicialmente?
D	Sim	Foram identificados os custos para desenvolvimento da tecnologia em escala operacional completa com fidelidade idêntica ao sistema final ou houve transmissão do conhecimento em parceria com a indústria?
D	Sim	Foi definido o cronograma para desenvolvimento em escala operacional completa junto a indústria?
D	Sim	Foi iniciado o programa de gestão de risco em parceria com a indústria para planejamento prévio de lançamento de mercado?
D	Sim	Documentação formal de regulamentação está concluída?
D	Sim	Foi concluída a documentação de continuidade e controle para aumento de escalabilidade?

21. Falta alguma pergunta ou abordagem específica nas questões referentes ao TRL 9?
Quais?

TRL 9		
T	Sim	Foi demonstrado o sistema real de forma completa?
T	Sim	Conceito operacional implementado com sucesso?
T	Sim	Tecnologia foi integrada plenamente à plataforma de sistema destinado?
T	Sim	Foi comprovada a funcionalidade em escala real, completa e com fidelidade idêntica ao sistema real?
M	Sim	Foram realizados todos os processos de fabricação controlados para o nível de qualidade adequado?
M	Sim	Validado nível de qualidade e segurança do projeto para escala real e completa?
D	Sim	Foi incluída a documentação com todo o processo de desenvolvimento em escala, o custo e o cronograma para lançamento em mercado?
D	Sim	Foi realizado comissionamento na fase de operação?
D	Sim	Foram finalizados os relatórios de operação?
D	Sim	Foi documentado o processo de parceria e de transferência de conhecimento para indústria?
D	Sim	Foi desenvolvido um plano de negócio para desenvolvimento da tecnologia?
D	Sim	Foram realizadas publicações científicas respeito da tecnologia?
D	Sim	Foram registradas patentes?
T	Sim	Foi validada a flexibilidade do projeto para reprodução posterior?
T	Sim	O subsistema encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?
T	Sim	O sistema geral em ambiente de escala operacional real foi operado com 100% de êxito?

22. Avalie a tela de resultados da avaliação de TRL. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Muito ruim e superficial	<input type="radio"/>	Muito boa e claro									

23. Demais comentários.
