



PROPOSTA DE MÉTODO PARA GESTÃO DE PORTFÓLIOS DE PROJETOS DE  
P&D BASEADO NA DINÂMICA DOS NÍVEIS DE MATURIDADE  
TECNOLÓGICA

Affonso Henriques de Lacerda Marçal Duarte

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Tharcisio Cotta Fontainha

Rio de Janeiro  
Outubro de 2024

PROPOSTA DE MÉTODO PARA GESTÃO DE PORTFÓLIOS DE PROJETOS DE  
P&D BASEADO NA DINÂMICA DOS NÍVEIS DE MATURIDADE  
TECNOLÓGICA

Affonso Henriques de Lacerda Marçal Duarte

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

---

Prof. Tharcisio Cotta Fontainha., Ph.D.

---

Prof. Marcus Vinícius de Araújo Fonseca., Ph.D.

---

Prof. Édison Renato Pereira da Silva., Ph.D.

---

Prof. Thiago Borges Renault., Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2024

Duarte, Affonso Henriques de Lacerda Marçal

Proposta de Método para Gestão de Portfólios de  
Projetos de P&D Baseado na Dinâmica dos Níveis de  
Maturidade Tecnológica/ Affonso Henriques de Lacerda  
Marçal Duarte – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

X, 97 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Tharcisio Cotta Fontainha

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de  
Engenharia de Produção, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 93-97

1. Technology Readiness Levels. 2. Dinâmica de progressão.
3. Método preditivo. I. Duarte, Affonso Henriques de Lacerda Marçal. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. PROPOSTA DE MÉTODO PARA GESTÃO DE PORTFÓLIOS DE PROJETOS DE P&D BASEADO NA DINÂMICA DOS NÍVEIS DE MATURIDADE TECNOLÓGICA.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROPOSTA DE MÉTODO PARA GESTÃO DE PORTFÓLIOS DE PROJETOS DE  
P&D BASEADO NA DINÂMICA DOS NÍVEIS DE MATURIDADE  
TECNOLÓGICA

Affonso Henriques de Lacerda Marçal Duarte

Outubro/2024

Orientador: Tharcisio Cotta Fontainha

Programa: Engenharia de Produção

Este trabalho desenvolve um método quantitativo de processamento e análise de dados que permite aos gestores estimarem, com base nos registros históricos de seu portfólio, a probabilidade de progressão de seus projetos para cada nível da escala TRL (Technology Readiness Level). Aplicado a um portfólio com 873 projetos de P&D em quatro categorias (Produto, Processo, Software e Estudo), o método gerou métricas gerenciais que refletiram a evolução dos projetos da organização estudada. A análise dos fluxos de progressão do TRL revelou padrões de progressão, regressão e cancelamento por tipo de projeto, destacando as probabilidades de sucesso técnico como principal descoberta. Houve variações significativas nas taxas de progressão entre diferentes níveis de TRL e tipos de projetos, com desafios maiores nos TRLs avançados, especialmente nas fases de testes piloto e demonstração. As principais contribuições desta pesquisa contemplam o enriquecimento dos marcos teóricos e a oferta de ferramentas práticas para gerentes de projetos que, a partir da aplicação deste método, poderão aferir métricas para melhor planejamento e alocação de recursos. O método, apesar de suas limitações, oferece um modelo robusto e adaptável para analisar a evolução de projetos em qualquer organização com dados de TRL.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Production Engineering (M.Sc.)

METHOD PROPOSAL FOR MANAGING R&D PROJECT PORTFOLIOS BASED  
ON THE DYNAMICS OF TECHNOLOGY READINESS LEVELS

Affonso Henriques de Lacerda Marçal Duarte

October/2024

Advisor: Tharcisio Cotta Fontainha

Department: Production Engineering

This study develops a quantitative data processing and analysis method that enables managers to estimate, based on their portfolio's historical records, the likelihood of their projects progressing through each level of the TRL (Technology Readiness Level) scale. Applied to 873 R&D projects in four categories (Product, Process, Software, and Study), the method generated management metrics that reflect the evolution of projects in the studied organization. The analysis of TRL progression flows revealed patterns of advancement, regression, and cancellation by project type, highlighting technical success probabilities as the main finding. Significant variations were observed in progression rates between different TRL levels and project types, with greater challenges found at advanced TRLs, especially in pilot testing and demonstration phases. The main contributions of this research include enriching the theoretical framework and providing practical tools for project managers, who can, through the application of this method, assess metrics for better planning and resource allocation. Despite its limitations, the method offers a robust and adaptable model for analyzing project evolution in any organization with TRL data.

Agradecimentos:

Gostaria de expressar, em primeiro lugar, minha mais profunda gratidão ao professor Marcus Vinicius Fonseca. Sem ele, nada disso teria sido possível. Desde o momento em que entrei em sua sala na UFRJ, apenas com uma vontade e uma ideia em mente, foi seu voto de confiança, apoio constante e palavras de incentivo que pavimentaram o caminho para a realização desta pesquisa. Sua orientação e generosidade foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Meu sincero agradecimento, mestre.

Agradeço, também, à minha mãe, que não só me deu a vida, mas sempre me incentivou nos estudos e, mesmo diante das dificuldades, nunca mediu esforços para me proporcionar a estrutura necessária. Sua dedicação foi crucial para que eu me tornasse o aluno, o profissional e o ser humano que sou hoje.

À minha família, sou imensamente grato pela paciência e compreensão nos momentos de ausência ao longo desta jornada. Seu apoio silencioso foi essencial para que eu pudesse me dedicar integralmente a este trabalho.

Minha gratidão se estende à querida amiga Rosa Ladeira, que conheci ao longo do mestrado. Sempre presente nos momentos de incerteza e dúvida, Rosa foi fundamental ao reafirmar o valor acadêmico e profissional deste trabalho, oferecendo apoio e incentivo inestimáveis.

Sou grato a todos os professores e colaboradores do PEP pelo acolhimento, carinho e respeito ao longo da minha jornada acadêmica. Foi uma grata surpresa encontrar tanta humanidade e solidariedade no ambiente racional da engenharia.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a Deus, que jamais nos desampara ao longo da caminhada.

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Caracterização do problema.....	4
1.3. Objetivos .....	7
1.4. Justificativa e Relevância da Pesquisa.....	8
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
2.1. Gestão de Portfólio de Projetos .....	12
2.2. Technology Readiness Levels .....	20
2.2.1. Gênese Histórica .....	20
2.2.2. Os nove níveis de Prontidão Tecnológica (TRL).....	23
2.2.3. Disseminação da Escala TRL .....	29
2.2.4. A Escala TRL na literatura acadêmica.....	33
2.2.5. Lacunas exploradas .....	42
<b>3. MÉTODO</b> .....	<b>47</b>
3.1. Caracterização da Pesquisa .....	47
3.2. Delineamento da Pesquisa .....	47
3.3. Composição da Amostra de Trabalho .....	48
3.4. Processamento e modelagem dos dados .....	49
3.5. Métricas utilizadas.....	52
3.5.1 Probabilidade de Transição TRL.....	52
3.5.2 Probabilidade de Progressão TRL.....	54
3.5.3 Vetor de Progressão TRL.....	54
3.5.4 Probabilidade Histórica de Sucesso Técnico .....	55
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>56</b>
4.1. Análise da Distribuição dos projetos por Status e Natureza .....	57
4.2. Análise dos TRLs iniciais e finais dos projetos.....	59
4.3. Análise das Matrizes de Transição TRL por Natureza de Projeto .....	63
4.3.1. Racional das métricas de fluxo transitório .....	65
4.3.2. Dinâmicas notáveis observadas nos fluxos transitórios .....	66
4.4. Análise dos vetores de progressão por Natureza de projeto.....	76
4.5. Análise das probabilidades de sucesso técnico por Natureza .....	80
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>84</b>
6.1. Resumo dos principais achados.....	84

6.2. Contribuições do estudo.....	86
6.3. Limitações da pesquisa .....	88
6.4. Sugestões para futuras pesquisas.....	89
6.5. Considerações finais .....	90
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>

## Índice de ilustrações

### Figuras

Figura 1 - Productivity Index .....	14
Figura 2 - Determinação do Expected Commercial Value (ECV) .....	14
Figura 3 - Dynamic Ordered List.....	15
Figura 4 - Question Scoring Model .....	16
Figura 5 - Diagrama de Bolhas 1 (Empresa do ramo químico).....	17
Figura 6 - Diagrama de Bolhas 2 (3M) .....	18
Figura 7 - Diagrama Risco x Retorno (Reckitt & Colman).....	18
Figura 8 - Escala TRL atual (NASA).....	22
Figura 9 - Síntese dos níveis de maturidade TRL.....	29
Figura 10 - Escala Research and Development Degree of Difficult (R&D3) .....	43
Figura 11 - Processo de filtragem para composição da amostra de trabalho.....	48
Figura 12 - Cenários genéricos do R&D3 para desenvolvimento de tecnologias.....	72

## **Tabelas**

Tabela 1 - Matriz de Evolução TRL (exemplo com oito projetos) .....	49
Tabela 2 - Matriz de Evolução TRL - número de transições - sem fator tempo (exemplo de 8 projetos) .....	50
Tabela 3 - Matriz de Transição TRL - Genérica .....	51
Tabela 4 - Exemplo de conversão dos registros quantitativos (Matriz de Transição TRL) para os registros probabilísticos (Matriz de Probabilidade de Transição TRL).....	53
Tabela 5 - Vetor de Progressão TRL - Genérico .....	55
Tabela 6 - Vetor de Progressão TRL - Hipotético .....	55
Tabela 7 - Distribuição quantitativa da base de trabalho por Status e Natureza de Projeto .....	57
Tabela 8 - Distribuição percentual da base de trabalho por Status e Natureza de Projeto.....	57
Tabela 9 - TRLs iniciais por Natureza de Projeto .....	59
Tabela 10 - TRLs finais dos projetos encerrados com Status “Concluído” por Natureza de Projeto .....	60
Tabela 11 - Matriz de Transição TRL - Software.....	63
Tabela 12 - Matriz de Transição TRL – Processo .....	64
Tabela 13 - Matriz de Transição TRL - Produto .....	64
Tabela 14 - Matriz de Transição TRL - Estudo.....	65
Tabela 15 - Dinâmica de progressão da maturidade tecnológica por Natureza.....	67
Tabela 16 - Dinâmica de regressão da maturidade tecnológica por Natureza .....	69
Tabela 17 - Proporção Regressão x Progressão por Natureza .....	70
Tabela 18 - Probabilidades de Progressão do TRL por Natureza de projeto e grau de elevação do TRL.....	80

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

O cenário empresarial contemporâneo, marcado pela dinamicidade e intensa competitividade, tem intensificado os desafios enfrentados pelos gestores de negócios. Sob essa nova conjuntura, abordagens tradicionais de gestão como aprimoramento da qualidade, controle de custos e redução de estoques, que antes eram consideradas adequadas para garantir o sucesso, mostram-se, cada vez mais, insuficientes (TEECE, 2007). Nesse contexto, as organizações se veem compelidas a empreender esforços na busca por inovações em seus produtos, processos e serviços (AL NAQBIA et al., 2020; FENG et al., 2021). A capacidade de inovar torna-se, portanto, um fator crítico para a sobrevivência e êxito nesse mercado desafiador e em constante evolução (DANNEELS, 2002).

Essa busca pela inovação visa, primordialmente, à obtenção de vantagens competitivas, permitindo que as empresas se destaquem em um mercado cada vez mais desafiador. A capacidade de inovar não apenas permite que as organizações atendam às demandas em constante evolução de seus clientes, mas também as coloca em uma posição favorável para competir com outras empresas. Nesse contexto, a pesquisa e o desenvolvimento de novos produtos, processos e estratégias de mercado tornam-se abordagens fundamentais para o sucesso das operações (FARIDA e SETIAWAN, 2022; HANA, 2013).

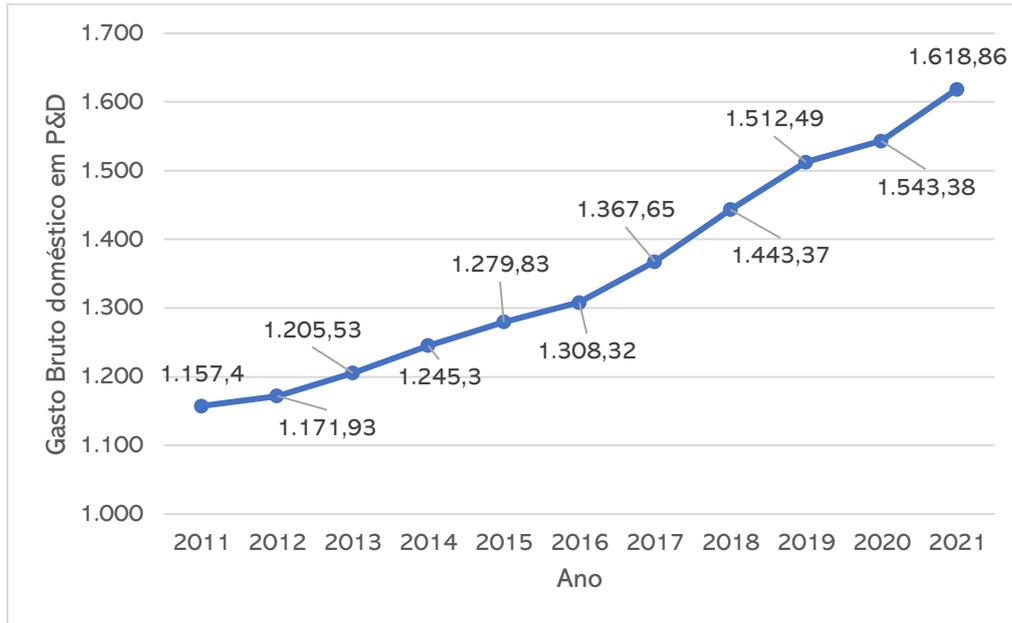
Um fato material que evidencia esse foco na inovação como força propulsora de vantagens competitivas consiste no aumento contínuo do fluxo de recursos empregados em atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Conforme revelado em dados divulgados pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), o gasto bruto interno em P&D<sup>1</sup> dos países sob monitoramento da instituição (Gráfico 1) apresentou um crescimento médio composto anual de, aproximadamente, 3,41% no período entre 2011 e 2021. Embora esse percentual possa não parecer expressivo à primeira vista, é crucial considerar que, em termos absolutos, alcançou um valor

---

<sup>1</sup> O gasto bruto interno em P&D é definido como a despesa total (corrente e de capital) em P&D realizada por todas as empresas residentes, institutos de pesquisa, universidades e laboratórios governamentais etc., em um país. Inclui P&D financiado do exterior, mas exclui fundos domésticos para P&D realizado fora da economia doméstica. Este indicador é medido em dólares (USD) a preços constantes, usando o ano base de 2015 e Paridades de Poder de Compra (PPCs) e como porcentagem do PIB.

significativo. Em 2021, esse investimento ultrapassou USD 1,618 trilhões, refletindo a importância estratégica e o impacto econômico substancial das atividades de P&D em escala global. Essa tendência ascendente evidencia o contínuo comprometimento de muitos países com o avanço científico e tecnológico, sinalizando a relevância cada vez maior atribuída à inovação como catalisadora do desenvolvimento econômico e social.

**Gráfico 1 – Gasto Bruto Doméstico Anual em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) dos países monitorados pela OCDE no período 2011 a 2021 (em bilhões de USD)**



Fonte: OECD (2023)

Esse compromisso crescente com as atividades de P&D demonstra de maneira contundente a busca por diferenciação praticada por muitas organizações atuais no cenário empresarial, onde a capacidade de inovar se tornou uma força motriz para o sucesso e a sustentabilidade nos mercados globais. Entretanto, é importante ressaltar que, apesar dos vultosos investimentos observados, o processo de inovação não segue um modelo determinístico, sendo, portanto, destituído de um caráter estritamente científico. A natureza inerentemente incerta das iniciativas inovadoras está associada ao fato de que a alocação de recursos substanciais nessas atividades não resulta, necessariamente, no crescimento da lucratividade (MORBEY, 1988). De maneira contrária, em alguns casos, a própria busca de crescimento por meio de inovações pode desencadear o declínio e, em última instância, a extinção de uma empresa (CHRISTENSEN e RAYNOR, 2003).

Dessa maneira, a complexidade e a dinâmica do ambiente empresarial atual dão origem a um terreno fértil para o risco, levando as organizações a adotarem uma abordagem

cautelosa que exige adaptação contínua. Tidd e Bessant (2015) corroboram essa alegação, destacando que o processo de desenvolvimento de projetos de inovação é caracterizado pela presença de riscos e incertezas, tornando-o uma atividade intrinsecamente complexa e desafiadora. Tal complexidade e incerteza ganham ainda maior vulto quando se trata da gestão de portfólios de projetos de inovação, onde a diversidade de projetos, cada um em diferentes estágios de desenvolvimento e com variados níveis de risco, torna imperativa a necessidade de uma abordagem estratégica criteriosa.

A dinâmica inerente à gestão de portfólios de projetos amplifica os desafios, uma vez que as interconexões entre os projetos, as limitações de recursos e as constantes evoluções nos status de desenvolvimento demandam cuidadosa consideração para otimizar o retorno sobre o investimento, garantir um portfólio balanceado e alinhar os esforços inovadores com os objetivos estratégicos da organização (COOPER e SOMMER, 2023, 2020). Nesse contexto, a compreensão do comportamento histórico dos níveis de maturidade tecnológica de cada projeto de um portfólio emerge como uma prática de relevância significativa, permitindo uma avaliação mais precisa do potencial de sucesso e dos riscos associados às iniciativas.

Um dos instrumentos criados com o propósito de atender a esse fim foram os Níveis de Prontidão da Tecnologia ou *Technology Readiness Levels* (TRL), neste trabalho referenciados como “Escala TRL”. De acordo com a definição de Mankins (1995), os Níveis de Prontidão da Tecnologia (TRLs) compõem “um sistema métrico e de classificação que permite avaliar a maturidade de uma tecnologia específica e comparar diferentes tipos de tecnologia quanto a seu grau de desenvolvimento”. Atuam dessa forma, portanto, como um instrumento de monitoramento e padronização do grau de desenvolvimento tecnológico de projetos de um portfólio, facilitando a compreensão mútua entre suas diferentes partes interessadas.

O presente estudo se concentra, então, na análise da referida Escala TRL aplicada à gestão de portfólios de projetos. Explorando seu caráter dinâmico, com ênfase nas transições de maturidade que ocorrem ao longo dos ciclos de vida dos projetos, a pesquisa investiga o papel desempenhado pela Escala TRL, especialmente no que tange às mudanças de maturidade tecnológica. Desta forma, tem como objetivo principal a proposição de um método quantitativo genérico de processamento e análise de registros históricos de TRL, que permita a gestores de projetos de inovação estabelecer, indutivamente, referenciais probabilísticos acerca do comportamento evolutivo dos projetos de seus portfólios. Ao

fazê-lo, busca fornecer uma compreensão mais profunda das dinâmicas que governam os graus de maturidade desses projetos, permitindo que esse conhecimento seja aplicado como inteligência de suporte à gestão de projetos de inovação tecnológica, contribuindo assim para a tomada de decisões embasadas e eficazes.

Dado o caráter genérico de aplicação do método proposto, este pode ser utilizado em dados históricos de organizações pertencentes a qualquer segmento de mercado, porte ou indústria ou até mesmo sobre bases hipotéticas geradas de maneira aleatória. Particularmente nesta pesquisa, o método proposto será aplicado sobre uma significativa base de dados históricos de TRL pertencente a uma organização atuante no desenvolvimento de novas tecnologias que, por razões de sigilo, não terá seu nome ou a descrição de seus projetos identificados.

## **1.2. Caracterização do problema**

A inserção estratégica da inovação nas agendas corporativas tem se intensificado, à medida que as organizações buscam não apenas manter-se relevantes, mas também assegurar sua longevidade em meio ao cenário competitivo contemporâneo. O reconhecimento da importância da inovação reflete a compreensão de que a capacidade de desenvolver e implementar novas ideias e soluções não apenas impulsiona a competitividade, mas também fortalece a resiliência das empresas diante das demandas em constante evolução do mercado. Essa mudança de paradigma ressalta a necessidade das organizações não apenas acompanharem, mas liderarem a transformação, buscando maneiras de inovar em produtos, processos e modelos de negócios (FARIDA e SETIAWAN, 2022; HANA, 2013).

Entretanto, a inovação, por sua natureza, não funciona sob as leis de uma ciência exata, o que implica que o investimento nessa área não assegura, por si só, o alcance dos objetivos estratégicos das organizações (MORBAY, 1988). A complexidade inerente ao processo de inovação, marcado por incertezas e riscos, destaca que o sucesso dessa empreitada não pode ser alcançado de maneira previsível. A esse respeito, Cooper e Sommer (2023) relatam que um estudo realizado junto a empresas integrantes do *Innovation Research Institute* (IRI) apontou uma taxa de acerto de cerca de 4 para 10 em relação à alocação de recursos de desenvolvimento nos produtos certos, estatística esta considerada “fraca” pelos autores.

A imprevisibilidade, porém, não diminui a importância da inovação; pelo contrário, ressalta a necessidade de uma abordagem estratégica e adaptativa por parte das organizações, que devem se renovar continuamente, de maneira a prosperar nesse ambiente dinâmico. (DANNEELS, 2002). Diante desse contexto desafiador, a gestão de um portfólio de projetos, realizada por meio da administração contínua e diligente de um grande conjunto de iniciativas de inovação, emerge como uma estratégia fundamental. Conduzida de maneira controlada e sistematizada, a gestão do portfólio de projetos permite aos gestores obterem uma combinação otimizada de projetos ativos, que mantenha o risco geral do portfólio em níveis razoáveis e, ainda assim, preserve seu retorno esperado (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2013).

A sistematização da gestão de um portfólio de projetos, no entanto, implica no uso de algumas ferramentas de gestão que dão suporte ao processo de seleção de projetos e sua gestão continuada. De acordo com um estudo feito por Cooper et al. (1997a, 1997b), onde foram levantadas e descritas diferentes práticas de gestão de portfólio de projetos nas empresas pesquisadas pelos autores, observou-se que o processo de seleção destes se estabelecia por meio de diferentes artifícios de normalização<sup>2</sup> que viabilizavam sua comparabilidade para posterior seleção. Esses artifícios, materializados por meio do uso de ferramentas quantitativas ou visuais, faziam uso de variáveis primárias diversas, quantitativas e qualitativas, como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, importância estratégica dos projetos, facilidade de implementação, impacto competitivo esperado e outras.

Contudo, dentre as variáveis primárias envolvidas nesse processo de normalização dos projetos, a “probabilidade de sucesso técnico” emergiu como um ponto comum nos diversos métodos apresentados pelos pesquisadores. Apesar de sua evidente importância, os estudiosos não aprofundaram o processo pelo qual as organizações obtêm essa probabilidade. Pelo contrário, eles apontaram a obtenção de dados quantitativos desse tipo como uma lacuna nos modelos, ressaltando que a dependência dessas variáveis representa uma fragilidade (COOPER et al., 1997a; COOPER e SOMMER, 2020). Isso se deve ao fato de que os percentuais aplicados, frequentemente, consistem em estimativas de baixa confiabilidade, destacando a necessidade de aprimoramento nesse aspecto para fortalecer a robustez dos modelos de gestão de portfólio de projetos.

---

<sup>2</sup> Para melhor compreensão de quais foram esses artifícios, suas fórmulas matemáticas, respectivas variáveis de cálculo e exemplos são apresentados na seção de fundamentação teórica deste trabalho.

A ausência de um processo fundamentado em bases científicas para a obtenção de uma variável tão decisiva no contexto da gestão de portfólios de projetos revela a persistência do empirismo nessa atividade. Além disso, considerando a natureza compartilhada e limitada dos recursos organizacionais destinados aos projetos de um portfólio, torna-se evidente que uma atribuição inadequada ou enviesada da probabilidade de sucesso das iniciativas pode resultar em desequilíbrio no rol de projetos, priorizando, por exemplo, projetos com baixa probabilidade de execução técnica em detrimento daqueles com maior viabilidade. Essa lacuna destaca a necessidade premente de desenvolver abordagens mais robustas e embasadas científica e praticamente para a avaliação e atribuição da probabilidade de sucesso técnico nos contextos de gestão de portfólio de projetos.

Qual seria, então, a fonte apropriada para a obtenção dessas probabilidades? Nesse contexto, esta pesquisa volta sua atenção para outra ferramenta de gestão, específica ao contexto das inovações: o Nível de Prontidão Tecnológica, comumente conhecido como *Technology Readiness Level* (TRL) ou, simplificada, Escala TRL.

Originada na NASA na década de 70 e aperfeiçoada posteriormente na década de 90, a Escala TRL constitui numa ferramenta de gestão elaborada com o intuito de monitorar e padronizar o grau de desenvolvimento tecnológico de projetos de inovação, facilitando a compreensão mútua entre suas diferentes partes interessadas. Composta por nove níveis de classificação que representam os possíveis graus de maturidade tecnológica de projetos em desenvolvimento, a Escala tem experimentado ampla adoção por parte de organizações inovadoras, tanto no âmbito público quanto no privado (OLECHOWSKI et al., 2020). Ela se consolidou como um instrumento essencial para alinhar as perspectivas de diferentes partes interessadas em projetos de tecnologia, facilitando a comunicação e a avaliação de seus status de desenvolvimento.

Em termos de sua utilização, a aplicação da Escala TRL baseia-se na classificação de tecnologias em desenvolvimento de acordo com níveis predefinidos de maturidade. À medida que essas tecnologias são aprimoradas e se avizinham de um estágio próximo ao de sua conclusão, elas avançam na escala, sendo, portanto, reclassificadas. Esse processo acontece de maneira iterativa até que o projeto ou componente de projeto atinja o TRL desejado (alvo), que caracteriza o atingimento de seu êxito técnico, ou venha a ser descontinuado (GAO, 2020). O atingimento do TRL desejado, então, pode ser visto como a confirmação da viabilidade técnica do projeto em desenvolvimento e, dessa forma, a probabilidade de amadurecimento de uma tecnologia, de seu grau inicial até o desejado,

figura como indicador potencial da probabilidade de sucesso técnico dos projetos em desenvolvimento.

Sendo assim, a compreensão dos fluxos transitórios de maturidade tecnológica atribuídos aos projetos de inovação se revela como um conhecimento de extrema relevância para o desenvolvimento de novas tecnologias. Essa perspectiva parte da proposição de que, ao mapear as probabilidades de transição de maturidade entre os distintos níveis da escala TRL, tais informações podem servir como uma aproximação, fundamentada em dados históricos, da probabilidade de sucesso técnico associada aos projetos de inovação. A adoção de tal abordagem, portanto, deslocaria a obtenção dessa métrica da esfera do empirismo para uma perspectiva embasada na realidade operacional das organizações, proporcionando, assim, uma base mais sólida para suas decisões estratégicas.

Tendo em vista a sistemática de controle e acompanhamento inerente à Escala TRL, observa-se, portanto, que os níveis de maturidade podem assumir um caráter altamente dinâmico, variando ao longo de todo o ciclo de vida de um projeto. Apesar disso, embora a classificação de maturidade de acordo com a Escala TRL apresente essa característica, sua aplicação tem sido, predominantemente, sob seu aspecto classificatório estático, servindo apenas como ponto de referência para aferição do grau de desenvolvimento tecnológico, corrente ou desejado, dos projetos. Como resultado, a dinâmica inerente à evolução desses projetos de tecnologia através dos vários níveis de maturidade permanece, em grande parte, inexplorada.

Esta abordagem unidimensional tem limitado a compreensão das complexas interações e desafios que surgem à medida que as tecnologias avançam em direção à prontidão para a produção. Portanto, identifica-se uma necessidade de investigação mais aprofundada nesse domínio, a fim de trazer luz às dinâmicas que governam os graus de maturidade desses projetos, permitindo que esse conhecimento seja aplicado como inteligência de suporte à gestão de portfólios de projetos de inovação tecnológica, contribuindo assim para o processo de tomada de decisão.

### **1.3. Objetivos**

Os argumentos expostos na seção anterior evidenciaram a problemática associada ao empirismo com que algumas métricas de gestão de portfólio são obtidas, ressaltando a importância da elaboração de novas estratégias para a obtenção dessas métricas, porém, dotadas de algum embasamento científico. Diante da necessidade de

superar essa deficiência identificada, a presente pesquisa tem como objetivo geral a proposição de um método abrangente e aplicável a qualquer organização para processar registros históricos de TRL relacionados a portfólios de projetos de P&D, com o intuito de obter referenciais estatísticos fundamentados em dados. Dessa forma, busca-se aprimorar o processo de obtenção da métrica da "probabilidade de sucesso técnico", ampliando sua robustez e fundamentação nas diversas práticas de gestão de portfólio de projetos.

Para o cumprimento desse objetivo principal proposto, este trabalho procederá a algumas etapas intermediárias que figuram como objetivos específicos desta pesquisa, a saber:

- a. Realizar uma investigação da literatura relacionada aos *Technology Readiness Levels* (TRL), com o objetivo de compreender sua origem, disseminação e situar esse tema no contexto acadêmico, compreendendo como essa ferramenta tem sido empregada na pesquisa e suas lacunas;
- b. Desenvolver e descrever detalhadamente a rotina de processamento de dados a ser aplicada sobre a base de trabalho, assegurando a padronização do processo de conversão do registro administrativo histórico de TRL em fluxos de transição de maturidade tecnológica;
- c. Estruturar uma lógica matemática, com base nos fluxos de transição, para a construção das Probabilidades de Sucesso Técnico;
- d. Aplicar o método sobre uma base histórica real de registros de TRL, quantificando e analisando os fluxos transitórios, de maneira a proporcionar uma visão quantitativa da dinâmica de maturidade tecnológica observada na base de estudo e analisar criticamente os resultados obtidos.

A pesquisa busca, assim, contribuir significativamente para a compreensão e aprimoramento das práticas de gestão de portfólio de projetos em um contexto de inovação tecnológica, visando fortalecer a robustez e eficácia desses processos nas organizações.

#### **1.4. Justificativa e Relevância da Pesquisa**

A gestão de portfólios de projetos de inovação é marcada por incertezas e riscos associados à conjugação das imprevisibilidades inerentes a seus projetos componentes. Nesse sentido, a seleção e gestão acertada dos projetos que os compõem constitui uma parte fundamental da atividade de gerir um portfólio. Cooper e Sommer (2020)

corroboram com esta colocação ao mencionarem que a gestão de portfólios para o desenvolvimento de novos produtos está intrinsecamente ligada a um processo de decisão sobre em quais iniciativas aplicar os recursos organizacionais para que o valor do portfólio seja maximizado e para que os recursos disponíveis e limitados sejam distribuídos de maneira balanceada entre os vários tipos de projeto.

Na busca por um processo racional que balize a alocação ótima de capital entre os projetos, respeitando os princípios básicos de maximização de valor; balanceamento e aderência estratégica, as organizações estruturaram uma série de técnicas de gestão de portfólio que por meios quantitativos ou visuais permitiam sua comparabilidade (COOPER et al., 1997a, 1997b) e que são utilizadas até os dias atuais (COOPER e SOMMER, 2023). No entanto, esses métodos requerem dos gestores a confecção de estimativas sobre variáveis de cálculo indisponíveis e sujeitas a muita incerteza. Dentre essas variáveis de cálculo necessárias à alimentação dos modelos de priorização encontra-se a probabilidade de sucesso técnico que figura como incógnita relevante e comum à grande maioria das técnicas aplicadas.

Kline e Rosenberg (2010), reforçam a importância da probabilidade do sucesso técnico como um fator determinante no êxito de inovações ao afirmarem que, no que tange, especificamente, a projetos de inovação, o êxito em sua consecução está intrinsecamente vinculado à gestão eficaz do aspecto comercial e do tecnológico. No que diz respeito ao aspecto tecnológico, os autores afirmam que a simples existência de uma demanda de mercado não garante o desenvolvimento de uma determinada tecnologia, uma vez que podem existir limitações de conhecimento para tal ou, até mesmo, restrições impostas por leis naturais (KLINE e ROSENBERG, 2010). Nesse sentido tornou-se imperativa a inclusão dessa variável nos modelos de priorização, de forma que a dificuldade associada ao processo de maturação de uma dada tecnologia em desenvolvimento fosse considerada na comparação dos projetos candidatos a compor o portfólio.

No entanto, a probabilidade de sucesso técnico constitui uma métrica de caráter altamente subjetivo, tornando-se, desta forma, difícil de ser mensurada. Além disso, por se tratar de uma variável, a princípio, qualitativa, está sujeita às percepções pessoais dos avaliadores que, de acordo com Rubenstein e Schröder (1977), sofrem influência de fatores de ordem pessoal, organizacional e situacional. No campo pessoal, os autores destacam o grau de instrução; experiência de trabalho e propensão a riscos dos avaliadores como os mais relevantes. Na esfera organizacional são destacadas a posição hierárquica dos avaliadores

e o sistema de recompensa da organização. Por fim, sob o aspecto situacional são mencionadas questões como o envolvimento do avaliador com o projeto em análise ou o grau de interesse da alta gerência em relação a este. A parcialidade intrínseca a esses fatores faz com que as probabilidades de sucesso aferidas pelos avaliadores durante o processo de decisão possam apresentar baixa acurácia e confiabilidade (SCHRÖDER, 1975), o que resulta, por vezes, em tomadas de decisão de qualidade insatisfatória.

Nesse sentido, a construção de uma lógica não empírica para estruturação das estimativas de probabilidade de sucesso técnico em projetos de inovação figura como um empreendimento de grande valia para gestores de portfólios. Cientes dessa importância, Davis et al. (2001) atuaram sobre essa lacuna desenvolvendo uma solução baseada em “escalas ancoradas”. A referida solução envolveu o mapeamento dos elementos de maior incidência de incerteza, técnica e comercial, em organizações praticantes de P&D para os quais foram cunhadas frases de “ancoragem” que guiam os avaliadores na tradução de suas percepções qualitativas na esfera quantitativa. As notas finais são, então, atribuídas em função de uma combinação dessas classificações conjugadas aos pesos atribuídos a cada um dos elementos avaliados. Apesar da tentativa dos autores de eliminar a estimativa da probabilidade de sucesso técnico do domínio do subjetivismo, ao adotar critérios de classificação predefinidos, a proposta ainda permanece suscetível ao empirismo. Isso ocorre em razão do fato de que, tanto as classificações quanto os pesos atribuídos aos elementos de avaliação, são exclusivamente fundamentados na percepção subjetiva dos avaliadores.

Frente à ausência de um método objetivo para a avaliação das probabilidades de sucesso técnico, que não esteja sujeito ao subjetivismo inerente à percepção pessoal dos avaliadores, a presente pesquisa se apresenta como uma proposta alternativa ao empirismo que permeia as práticas convencionais. Sendo a solução proposta neste trabalho baseada em dados históricos e quantitativos relacionados aos fluxos de transição TRL de um portfólio de projetos de P&D, ela proporciona benefícios aos gestores de portfólio que destacam sua relevância. Estes serão enumerados e apresentados a seguir:

#### A. Mitigação da influência de percepções pessoais

A primeira contribuição relevante desta pesquisa reside na mitigação da influência das percepções pessoais no processo de avaliação de probabilidades de sucesso técnico. Ao

adotar uma abordagem fundamentada em dados históricos e quantitativos, a pesquisa propõe uma metodologia que reduz a subjetividade inerente às análises baseadas na percepção individual dos avaliadores, conferindo maior consistência ao processo decisório na gestão de portfólio de projetos. Esse benefício vai ao encontro de um dos objetivos de Davis et al. (2001) que ao desenvolverem o modelo das escalas ancoradas tiveram como objetivo a criação de um método que “garantissem que pessoas diferentes avaliando um mesmo projeto chegassem a respostas semelhantes” (DAVIS et al., 2001).

#### B. Aprimoramento da tomada de decisão

Outro benefício relevante que emerge desta pesquisa está associado ao aprimoramento da tomada de decisão no contexto da gestão de portfólio de projetos. Ao fornecer referenciais estatísticos e embasados em dados, a metodologia proposta oferece subsídios que removem a obtenção da métrica de probabilidade de sucesso técnico dos projetos da esfera do empirismo, permitindo que os gestores possam tomar decisões mais informadas e estratégicas. Dessa forma, a pesquisa atua sobre a lacuna identificada por Schröder (1975), proporcionando indicadores mais acurados e confiáveis e, dessa forma, contribuindo para a eficiência e eficácia das práticas de gestão de portfólio.

#### C. Mitigação de riscos

Além disso, a pesquisa desempenha um papel crucial na mitigação de riscos ao introduzir uma abordagem mais objetiva na avaliação das probabilidades de sucesso técnico. Ao adotar critérios claros baseados em dados históricos de TRL de uma grande massa de projetos, a metodologia proposta cria referenciais comparativos que orientam os gestores acerca do aproveitamento evolutivo de seus projetos. De posse desses referenciais, torna-se mais fácil compreender desvios de performance nos empreendimentos do portfólio, e até mesmo no seu processo de gestão, o que proporciona maior segurança na seleção e priorização de projetos, minimizando potenciais impactos negativos e contribuindo para a gestão mais efetiva de riscos.

#### D. Otimização de recursos

Outro benefício relevante da pesquisa é a otimização de recursos no ambiente organizacional. Ao fundamentar as decisões de gestão de portfólio em dados quantitativos, a metodologia proposta ajuda a maximizar o uso eficiente dos recursos

organizacionais. Tal benefício se sustenta sobre o fato de que direcionar investimentos para projetos com maior probabilidade de sucesso técnico resulta em uma alocação mais estratégica de recursos. Isso contribui, por conseguinte, para a maximização do retorno sobre o investimento que de acordo com Cooper et al. (1997a), constitui um dos principais propósitos da gestão de portfólios.

#### E. Contribuição para a literatura acadêmica

Por fim, a pesquisa oferece uma contribuição valiosa para a literatura acadêmica ao preencher uma lacuna existente na abordagem da obtenção de probabilidades de sucesso técnico integrada ao fluxo de maturidades de acordo com a Escala TRL. Ao desenvolver uma metodologia baseada em dados históricos e quantitativos, a pesquisa enriquece o corpo de conhecimento na área de gestão de portfólio de projetos. Essa contribuição não apenas amplia a compreensão existente, mas também oferece uma perspectiva inovadora que pode inspirar pesquisas futuras e avanços na disciplina, consolidando-se como um marco significativo no campo acadêmico.

Em síntese, esta pesquisa visa, não apenas preencher uma lacuna de conhecimento na literatura acadêmica, mas também fornece ferramentas práticas e estratégicas para gestores de portfólio de projetos, agregando valor substancial à prática da gestão de inovação e projetos tecnológicos.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção, são abordados os principais elementos da revisão bibliográfica que constituem o referencial teórico fundamental na orientação do desenvolvimento da pesquisa em questão.

### **2.1. Gestão de Portfólio de Projetos**

Na dinâmica incerta do desenvolvimento de inovações, a concentração exclusiva de esforços de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em um número limitado, ou até mesmo em um único projeto inovador, representa uma decisão potencialmente arriscada e prejudicial para uma organização. Esse risco cresce, exponencialmente, no caso de inovação incremental, inovação *hardtech* e inovação *deeptech*. Nesse contexto, a diversificação estratégica de projetos surge como uma abordagem crucial para atenuar a incerteza intrínseca a essas empreitadas. Este argumento encontra respaldo na teoria das

fronteiras eficientes, desenvolvida por Markowitz (1952) no âmbito da composição ótima de portfólios de investimento. Segundo essa teoria, ao combinar diferentes tipos de ativos, os investidores podem minimizar o risco de um portfólio e maximizar seu retorno. Analogamente, considerando os projetos de inovação como ativos suscetíveis a riscos, a distribuição estratégica dos recursos organizacionais voltados à inovação em uma variedade de projetos não apenas amplia as chances de sucesso, mas também constitui uma eficaz estratégia de gestão de riscos. Essa abordagem confere à organização uma resiliência e adaptabilidade fundamentais diante da complexidade inerente ao processo de desenvolvimento inovador, contribuindo para a maximização dos resultados e a minimização dos impactos adversos.

No entanto, a obtenção dos benefícios provenientes da diversificação de projetos não ocorre sem desafios adicionais. Ao lidar com a gestão simultânea de diversos projetos, surge a necessidade de gerenciar eficientemente os recursos limitados da organização, abrangendo áreas como capital, insumos e recursos humanos (JAFARZADEH et al., 2022). Este cenário destaca a importância da disciplina conhecida como gestão de portfólio (*Portfolio Management*), que visa otimizar a alocação de recursos, assegurando que cada iniciativa contribua efetivamente para os objetivos estratégicos da organização.

De acordo com Cooper et al. (1997a) a gestão de portfólio constitui um processo dinâmico de decisão que visa a constante atualização do rol de projetos ativos, definindo quais devem ser selecionados e mantidos, e quais devem ser cancelados. Trata-se, basicamente, de um processo de escolha sistemático e iterativo sobre quais projetos a organização deve apoiar frente às oportunidades que se apresentam. Muito embora essa definição remeta a algo trivial, a seleção dos projetos de um portfólio é extremamente desafiadora à medida que muitas vezes se baseia em informações incertas e em constante mudança.

A pesquisa conduzida por Cooper et al. (1997a, 1997b) em colaboração com 35 empresas proeminentes em suas respectivas indústrias revelou três diretrizes-chave adotadas por essas organizações em relação às suas práticas de gerenciamento de portfólio. Estas foram: (1) maximização do valor agregado do conjunto de projetos, (2) balanceamento das iniciativas em desenvolvimento e (3) alinhamento do portfólio com a estratégia da organização. Vale ressaltar que, embora o trabalho dos referidos autores remeta a um estudo datado de 1997, o mais recente artigo do professor Robert G. Cooper (COOPER e SOMMER, 2023) faz menção à utilização de algumas das práticas levantadas nesse

estudo até os dias de hoje. Essa referência aponta para a persistente relevância e validade dessas abordagens, indicando que suas contribuições permanecem aplicáveis ainda no cenário contemporâneo.

Em relação à primeira diretriz, maximização do valor agregado, os autores relatam que esta remete à busca das organizações por uma alocação otimizada de recursos entre seus projetos, de maneira a maximizar a métrica financeira de referência da organização como, por exemplo, lucratividade ou retorno sobre o investimento (ROI). Para tal, os autores descreveram algumas práticas aplicadas como o *Expected Commercial Value* (ECV), *Productivity Index* (PI), *Dynamic Rank Ordered List* e *Scoring model* (COOPER et al., 1997a, 1997b). As Figuras 1, 2, 3 e 4 demonstram como se determina o PI, ECV, um exemplo da *Dynamic Rank Ordered List* e um guia de referência para aplicação do *Scoring model*, respectivamente.

O *Productivity Index* (PI) é obtido por meio da equação:

$$PI = \frac{(ECV \times P_{ts} - R\&D)}{R\&D}$$

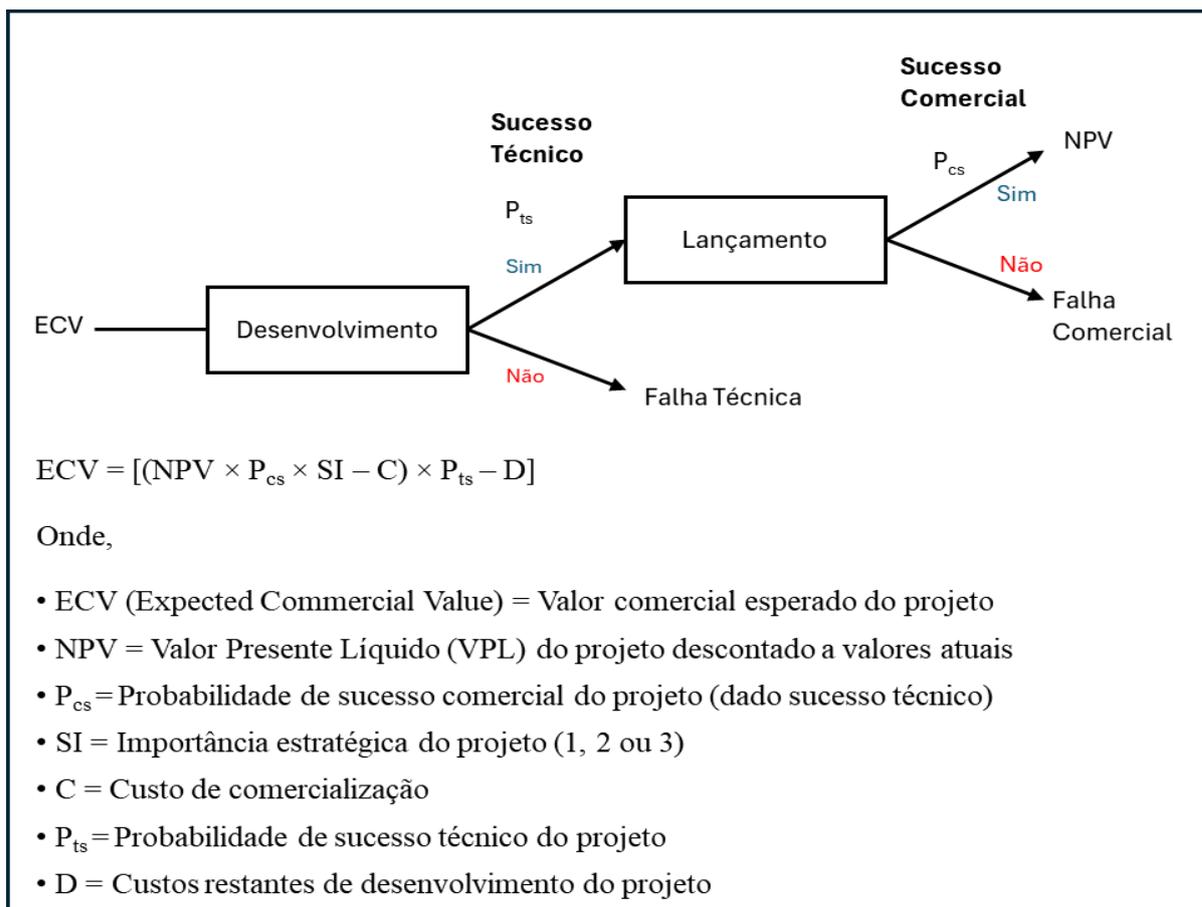
Onde,

- *ECV* (*Expected Commercial Value*) = Fluxo de caixa esperado do projeto descontado até o tempo presente, assumindo sucesso técnico do projeto
- $P_{ts}$  = Probabilidade de sucesso técnico do projeto
- *R&D* = Gastos esperados restantes relacionados ao processo de Pesquisa e Desenvolvimento. Gastos já incorridos são considerados como gastos afundados (*sunk costs*) e, portanto, irrelevantes no processo decisório.

Os projetos são classificados de acordo com esse índice de maneira a se obter o portfólio ideal

**Figura 1 - Productivity Index**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir da figura de Cooper et al. (1997a)



**Figura 2 - Determinação do Expected Commercial Value (ECV)**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir da figura de Cooper et al. (1997a)

Nome do Projeto	IRR*PTS	VPL*PTS	Importância Estratégica	Pontuação de Ranqueamento
Alpha	16,0 (2)	8,0 (2)	5 (1)	1,67 (1)
Epsilon	10,8 (4)	18,0 (1)	4 (2)	2,33 (2)
Delta	11,1 (3)	7,8 (3)	2 (4)	3,33 (3)
Omega	18,7 (1)	5,1 (4)	1 (6)	3,67 (4)
Gamma	9,0 (6)	4,5 (5)	3 (3)	4,67 (5)
Beta	10,5 (5)	1,4 (6)	2 (4)	5,00 (6)

**Nota:** Ambos IRR e VPL são multiplicados pela Probabilidade de Sucesso Técnico.  
Os projetos são ranqueados de acordo com três critérios – os números em parênteses mostram a posição do projeto em cada coluna. Projetos são colocados em ordem de ranking até que não haja mais recursos  
\* A coluna final corresponde à média aritmética dos ranqueamentos obtidos nos três critérios.  
Essa é a nota final atribuída aos seis projetos em análise, sendo o projeto Alpha o primeiro colocado e o projeto Beta o último.

**Figura 3 - Dynamic Ordered List**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir da figura de Cooper et al. (1997a)

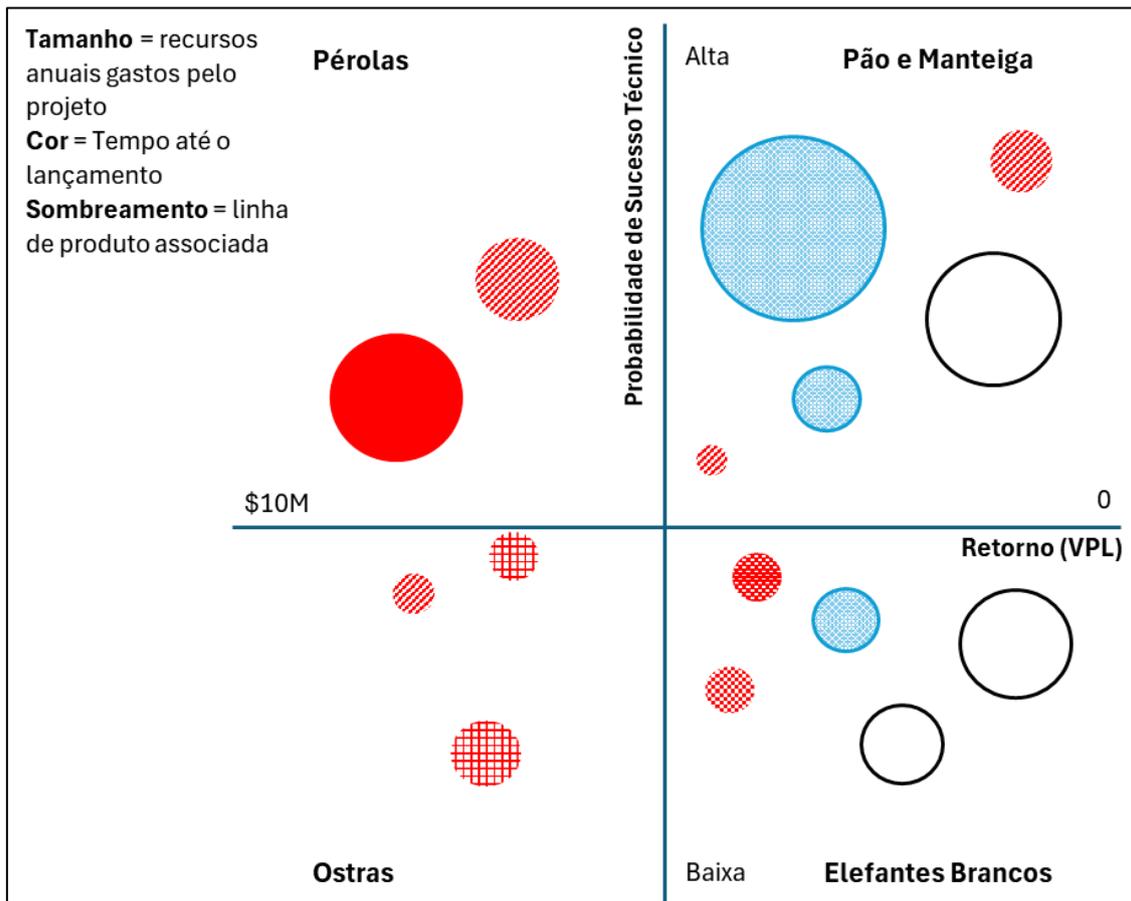
<p><b>★Recompensa:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribuição absoluta para a lucratividade (fluxo de caixa em 5 anos: fluxos de caixa cumulativos menos todos os custos em dinheiro, antes de juros e impostos).</li> <li>• Retorno tecnológico: o número de anos para que o fluxo de caixa cumulativo iguale todos os custos em dinheiro gastos antes da data de início da operação.</li> <li>• Tempo para o início da operação comercial.</li> </ul> <p><b>★Ajuste à Estratégia Empresarial:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Congruência: quão bem o programa se encaixa na estratégia (declarada ou implícita) para a linha de produtos, Negócio e/ou Empresa.</li> <li>• Impacto financeiro e estratégico do programa na linha de produtos, Negócio e/ou Empresa (pontuado de "mínimo" a "crítico").</li> </ul> <p><b>★Alavancagem Estratégica:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Posição proprietária.</li> <li>• Plataforma para crescimento (de "único" para "abre novos campos técnicos e comerciais").</li> <li>• Durabilidade: a vida útil do produto no mercado (anos).</li> <li>• Sinergia com outras operações/negócios dentro da corporação.</li> </ul> <p><b>★Probabilidade de Sucesso Comercial</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência de uma necessidade de mercado.</li> <li>• Maturidade do mercado (de "declínio" a "crescimento rápido").</li> <li>• Intensidade competitiva: quão acirrada ou intensa é a competição.</li> <li>• Existência de habilidades de desenvolvimento de aplicações comerciais de "nova" a "já existentes".</li> <li>• Suposições comerciais (de "baixa probabilidade" a "altamente previsível").</li> <li>• Impacto regulatório/social/político (de "negativo" a "positivo").</li> </ul> <p><b>★Probabilidade de Sucesso Técnico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lacuna técnica (de "grande lacuna" para "melhoria incremental").</li> <li>• Complexidade do programa.</li> <li>• Existência de uma base de habilidades tecnológicas (de "nova" a "amplamente praticada na empresa").</li> <li>• Disponibilidade de pessoas e instalações (de "deve contratar/construir" para "imediatamente disponível").</li> </ul>
--

**Figura 4 - Question Scoring Model**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir da figura de Cooper et al. (1997a)

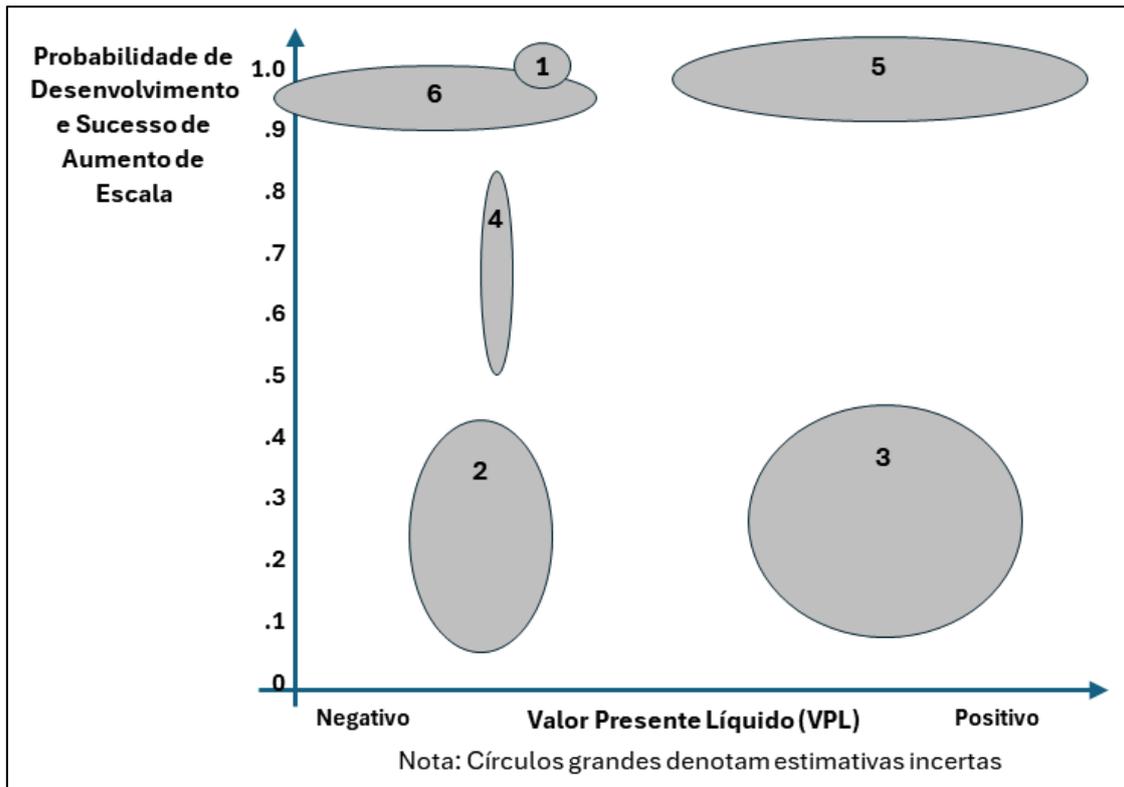
Já em relação à diretriz que objetiva o balanceamento das iniciativas em desenvolvimento, os autores reportam que essa abordagem se trata de uma analogia à operação de um fundo de investimento onde o gestor do fundo busca uma combinação ideal em termos de risco, setor econômico ou local de atuação das empresas investidas. Da mesma forma, o balanceamento do portfólio também busca, por meio da diversificação, equilibrar parâmetros-chave como: adequação dos projetos com o negócio ou estratégia corporativa; mérito inventivo e importância estratégica para o negócio; durabilidade proporcionada pela vantagem competitiva, recompensa em termos financeiros, impacto competitivo da tecnologia, probabilidade de sucesso técnico e comercial, custos de P&D, tempo estimado para o restante de projeto, investimento de capital e marketing necessários para exploração da iniciativa (COOPER et al., 1997a).

Diferentemente da diretriz de maximização do valor agregado que utiliza uma abordagem unicamente quantitativa de ordenamento dos projetos, a diretriz de balanceamento mostrou fazer amplo uso de artifícios visuais como gráficos (de quadrantes ou bolhas) e diagramas para plotar as análises realizadas sob as diversas dimensões consideradas. As Figuras 5, 6 e 7, a seguir, demonstram algumas dessas ferramentas visuais utilizadas.



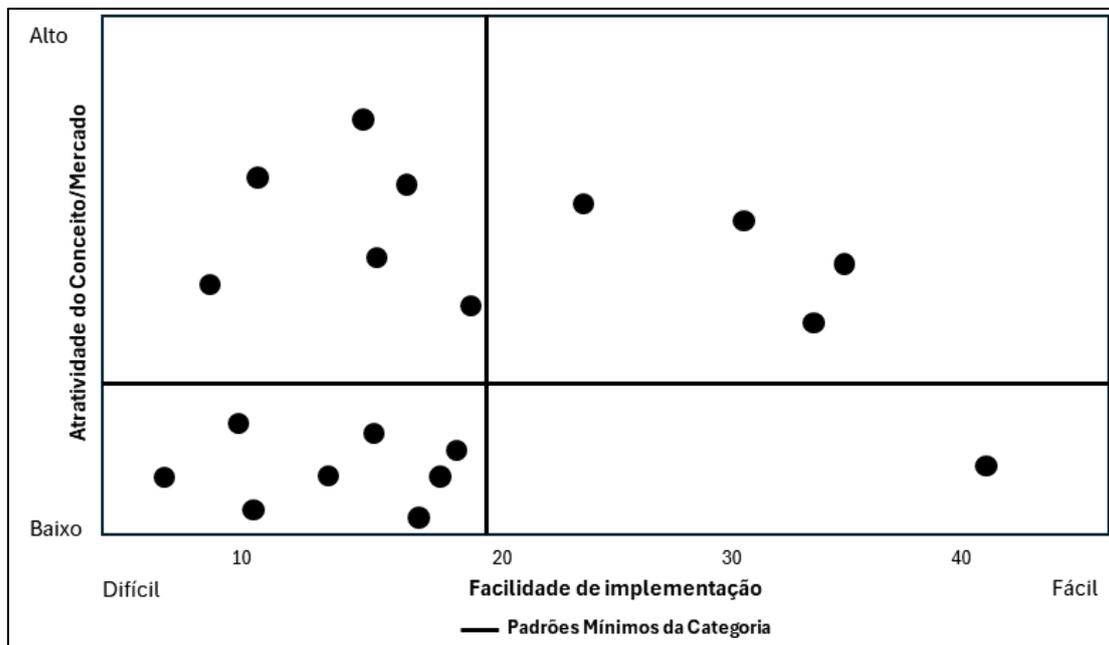
**Figura 5 - Diagrama de Bolhas 1 (Empresa do ramo químico)**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir da figura de Cooper et al. (1997a)



**Figura 6 - Diagrama de Bolhas 2 (3M)**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir da figura de Cooper et al. (1997a)



**Figura 7 - Diagrama Risco x Retorno (Reckitt & Colman)**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir da figura de Cooper et al. (1997a)

A terceira diretriz, alinhamento do portfólio com a estratégia da organização, acaba sendo autoexplicativa, uma vez que manifesta a intenção das organizações de alocar seu capital em projetos que materializem, de fato, as diretrizes estratégicas desta. Nesse sentido, os autores argumentam que a estratégia só se efetiva quando as organizações aplicam seu capital em iniciativas que realmente materializem a visão estratégica das companhias. Dessa forma, enquanto os recursos não forem efetivamente alocados nos projetos alinhados à visão da organização, o documento de planejamento estratégico permanece apenas como uma expressão teórica sem aplicação prática, algo que os autores revelam não ser incomum no ambiente corporativo.

Para a seleção das iniciativas do portfólio, considerando essa terceira diretriz, é possível empregar abordagens tanto quantitativas, utilizadas pela diretriz de maximização do valor, quanto visuais, aplicadas na diretriz de balanceamento. Nesse contexto, basta adicionar parâmetros de composição da métrica que estejam relacionados ao grau de alinhamento estratégico dos projetos. Além disso, os pesquisadores destacam uma abordagem conhecida como *Strategic Buckets Model* ou em tradução livre “Modelo dos Baldes Estratégicos”. Essa técnica envolve a alocação antecipada de capital com base em temas alinhados às diretrizes estratégicas da organização. Após essa alocação, os projetos são categorizados de acordo com os temas estratégicos, de modo que a projeção de recursos seja predominantemente guiada pela estratégia organizacional, fugindo de critérios exclusivamente financeiros.

Um aspecto notável e relevante acerca dos processos de aquisição das métricas apresentadas está centrado no fato de que, apesar de cada uma delas seguir uma estrutura lógico-matemática única e distintiva, há uma variável comum a todas: a probabilidade de sucesso técnico. Contudo, é relevante observar que os pesquisadores não aprofundam o processo pelo qual as organizações obtêm essa probabilidade. Pelo contrário, eles indicam que a obtenção desse dado e de outros constitui uma lacuna nos modelos, salientando que a inclusão dessa variável representa uma fragilidade, uma vez que os percentuais aplicados frequentemente consistem em estimativas de baixa confiabilidade.

## 2.2. Technology Readiness Levels

### 2.2.1. Gênese Histórica

Assim como acontece em grande parte das inovações, o TRL foi criado para suprir uma necessidade; porém o entendimento adequado de sua criação perpassa pela compreensão de seu contexto histórico.

No artigo seminal “*The Nasa Technology Push Towards Space Mission Systems*” Sadin et al. (1989) relatam que o atual conceito de *Technology Readiness Level*, comumente conhecido como TRL, foi introduzido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) no âmbito do programa de exploração espacial norte-americano. À época, o presidente americano Ronald Reagan instituiu por meio da *National Security Decision Directive* (REAGAN, 1988) uma mudança estratégica na política de desenvolvimento de tecnologias espaciais que deixaria de estar restrita às instituições governamentais, passando a encorajar esforços cooperativos entre a NASA e parceiros extragovernamentais nacionais ou internacionais. Adicionalmente, na mesma época, os Estados Unidos enfrentaram uma tragédia impactante com a explosão da espaçonave *Challenger* logo após seu lançamento, resultando na trágica perda de seus sete tripulantes (FELDMAN, 2000). Esse evento abalou profundamente a nação norte-americana e foi determinante para impulsionar o país à busca de um modelo mais seguro no que tangia ao desenvolvimento de tecnologias espaciais (HÉDER, 2017).

De acordo com Sadin et al. (1989), o desenvolvimento de novas tecnologias por parte da NASA era conduzido por meio de um programa denominado *Advanced Research and Technology* (ART) responsável pela renovação do acervo tecnológico da Agência. O Programa foi responsável pelo desenvolvimento de algumas tecnologias que resultaram no sucesso de missões importantes, porém os gerentes de projetos de voo, reticentes em utilizar algumas dessas novas soluções em missões de campo em razão do risco que apresentavam, acabavam optando pelo uso de tecnologias anteriores adaptadas. Essas tecnologias recondiionadas eram provenientes de um programa concorrente chamado *Supporting Research and Technology* (SRT) e, embora atenuassem o nível de incerteza de sucesso quanto a sua aplicação, não contribuíam de maneira significativa para o aprimoramento tecnológico da Agência. Dessa forma, passou a ser necessária a implementação de uma nova solução de gestão que proporcionasse avanços tecnológicos substanciais com níveis aceitáveis de risco.

Relatam ainda os autores que, durante uma investigação das origens do risco associado às novas tecnologias, foi evidenciado que a diferença entre o êxito e o fracasso no emprego de tecnologias recém-criadas, originadas a partir do programa ART, estava relacionada à eficácia e à profundidade desse programa em perseguir a maturidade tecnológica. Além disso, detectou-se um desafio adicional decorrente da disparidade de perspectivas entre pesquisadores e planejadores de missão em relação ao estágio atual e desejado de desenvolvimento de uma tecnologia específica. Esse ruído de comunicação, frequentemente, acabava por ocasionar o aborto de novos projetos em desenvolvimento, levando à utilização de tecnologias adaptadas provenientes do Programa SRT.

Com o propósito de abordar essas questões, a NASA formulou em 1974 (ALEXANDER, 2018) uma escala de maturidade de sete estágios para gerar entendimento mútuo e facilitar acordos de transferência de tecnologia entre pessoal de pesquisa, gerentes de projeto, e gerentes de programas de voo de missão (SADIN et al., 1989; MANKINS, 2009). Embora no documento escrito por Sadin et al. (1989) a primeira escala publicada esteja estruturada por meio de sete níveis de maturidade, Mankins (2009) menciona que as primeiras versões da escala TRL eram compostas por seis ou sete níveis, cada qual com caracterizações sintéticas de cada estágio compreendendo não mais que uma linha. A escala original pode ser vista no Quadro 1.

**Quadro 1 - Escala TRL originária (NASA)**

<b>NÍVEL</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
NÍVEL 1	PRINCÍPIOS BÁSICOS OBSERVADOS E REPORTADOS
NÍVEL 2	APLICAÇÕES POTENCIAIS VALIDADAS
NÍVEL 3	PROVA DE CONCEITO DEMONSTRADA ANALITICAMENTE E/OU EXPERIMENTALMENTE
NÍVEL 4	COMPONENTE E/OU PLACA DE TESTES VALIDADO LABORATORIALMENTE
NÍVEL 5	COMPONENTE E/OU PLACA DE TESTES VALIDADO EM AMBIENTE SIMULADO OU EM AMBIENTE ESPACIAL REAL
NÍVEL 6	ADEQUAÇÃO DE SISTEMA VALIDADA EM AMBIENTE SIMULADO
NÍVEL 7	ADEQUAÇÃO DE SISTEMA VALIDADA EM AMBIENTE ESPACIAL

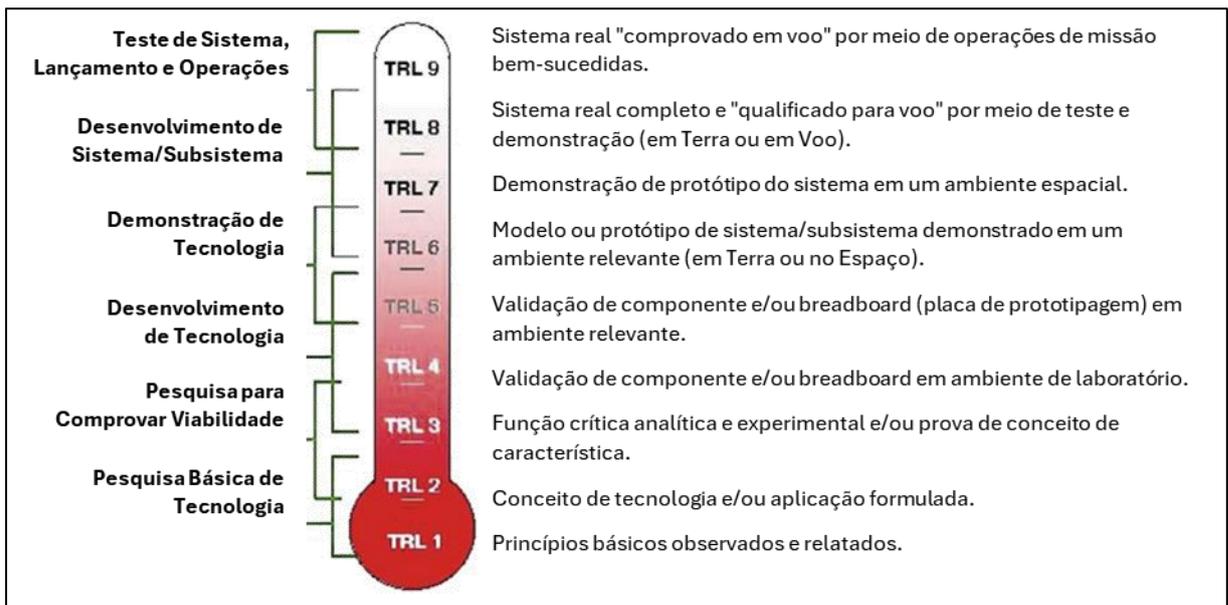
Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Sadin et al. (1989)

Conforme ilustrado no Quadro 1, a escala estabelece uma relação entre níveis ordenados de maturidade e características qualitativas que descrevem o grau de prontidão da tecnologia em processo de desenvolvimento. O nível 1 está associado a tecnologias em

estágios iniciais, enquanto o nível 7 representa tecnologias com maturidade mais avançada. Conforme o projeto avança em seu desenvolvimento, o grau de maturidade é revisado até atingir o nível desejado. Essa estrutura proporciona uma abordagem sistemática para avaliar o progresso e a maturidade tecnológica ao longo do tempo.

A implantação dessa nova escala no processo de gestão tecnológica da NASA permitiu que seus usuários determinassem com mais precisão o nível de desenvolvimento pretendido para uma determinada nova tecnologia, o que levou a expectativas alinhadas entre as partes interessadas. Ainda segundo Mankins (2009), outra vantagem proporcionada pela ferramenta foi a possibilidade de comparação de maturidade entre diferentes tipos de tecnologia, uma vez que os estágios de maturidade da nova escala não precisavam estar, necessariamente, vinculados ao contexto do desenvolvimento de tecnologias espaciais.

Posteriormente, na década de 1990, a escala original de sete estágios foi revisada, ganhando níveis adicionais e um conjunto mais abrangente de definições. A nova versão composta por nove níveis de maturidade pode ser observada em seguida na Figura 8.



**Figura 8 - Escala TRL atual (NASA)**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Mankins (2009)

O documento intitulado “*Technology Readiness Levels a White Paper*” de 1995 se notabiliza dentro da literatura do TRL, pois nele Mankins não só formaliza a expansão da escala para nove níveis de maturidade como descreve cada um dos níveis. Além disso, fornece exemplos dentro do contexto da NASA e ainda faz alusão à expectativa de custo de atingimento para cada um desses níveis de maturidade. Curiosamente, apesar da escala aprimorada ter sido publicada por Mankins somente em 1995, o referido autor afirma que esta já estava em uso pela NASA em 1989, mas só foi publicada por ele em 1995 e continua sendo o padrão oficial até hoje (MANKINS, 2009). Conforme pode ser observado na Figura 8, a nova versão é composta por nove níveis que vão desde a pesquisa básica até a homologação do uso da tecnologia em ambiente operacional.

### 2.2.2. Os nove níveis de Prontidão Tecnológica (TRL)

Conforme abordado anteriormente, os nove níveis de prontidão tecnológica refletem estágios evolutivos esperados ao longo do desenvolvimento de uma dada tecnologia. Cada um deles possui características próprias que os distinguem entre si em termos de maturidade, custos e riscos e estas serão elucidadas nesta seção. Para a composição das descrições dos diferentes níveis foram utilizados como fonte de informação os trabalhos de Mankins (1995), Mankins (2002), Mankins (2009), Moorhouse (2001), Bilbro (2006) e GAO (2020)

### TRL 1 – Princípios básicos observados e reportados

O *Technology Readiness Level* (TRL) 1 representa o estágio inicial de maturação tecnológica, onde a pesquisa científica começa a se traduzir em pesquisa e desenvolvimento aplicados. Neste nível, atividades como estudos sobre propriedades básicas de materiais são realizados.

Os custos associados para atingir o TRL 1 podem variar significativamente, desde valores muito baixos, quando os programas de pesquisa científica arcam com o investimento, até custos muito elevados, dependendo da disciplina de pesquisa envolvida. Por exemplo, descobertas fundamentais em aerodinâmica ou bioquímica, que envolvem grandes infraestruturas como túneis de vento ou laboratórios e supercomputadores, tendem a ter custos substancialmente mais altos do que a descoberta de novos algoritmos computacionais, que podem ser realizadas por um ou mais pesquisadores com uma prancheta e um computador de mesa. Atividades do TRL 1, tipicamente, são desempenhadas por universidades e centros de pesquisa.

### TRL 2 – Conceito ou aplicação tecnológica formulada

A partir da observação dos princípios físicos básicos, o próximo nível de maturação tecnológica, representado pelo *Technology Readiness Level* (TRL) 2, envolve a formulação de conceitos ou aplicações práticas dessas características identificadas. Nesse estágio, potenciais aplicações de novos materiais podem ser definidas. As aplicações ainda são especulativas, carecendo de prova experimental ou análise detalhada para sustentar as conjecturas.

Os custos associados ao alcance do TRL 2 são geralmente baixos, representando apenas uma fração pequena dos custos de uma aplicação de sistema eventual. Além disso, assim como no TRL 1, esses custos são únicos, variando significativamente entre disciplinas de pesquisa ou invenções. Essas atividades são frequentemente conduzidas por diversas organizações, incluindo universidades, pequenas empresas e empreendedores individuais. Em resumo, o TRL 2 marca a transição da teoria para experimentação prática, consolidando as bases para o desenvolvimento tecnológico futuro.

### TRL 3 – Prova de conceito analítica e experimental de função crítica e/ou característica

O *Technology Readiness Level* (TRL) 3 marca o início da fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) ativa. Essa fase engloba tanto estudos analíticos para situar a tecnologia em um contexto apropriado quanto experimentos laboratoriais para validar

fisicamente as previsões analíticas. Esses estudos e experimentos constituem a validação da "*proof-of-concept*" das aplicações/conceitos formulados no TRL 2. O TRL 3 inclui abordagens tanto "analíticas" quanto "experimentais" para comprovar um conceito específico, sendo a escolha entre elas dependente, em parte, dos fenômenos físicos envolvidos na invenção. Enquanto sistemas físicos ou químicos relativamente simples podem ser "provados" mesmo no nível do "quadro-negro", outras invenções requerem validação experimental, especialmente aquelas envolvendo conceitos altamente complicados ou dependentes de fenômenos ambientais ou efeitos de materiais inovadores.

Os custos para atingir o TRL 3 são tipicamente de "baixos a moderados", representando, em geral, ainda uma fração modesta dos custos de uma aplicação de sistema. Novamente, esses custos são em grande parte "únicos para a tecnologia", variando significativamente de uma área de pesquisa e desenvolvimento para outra. Essas atividades podem ser empreendidas por diversos tipos de organizações, mas, em razão de custos crescentes, envolvem frequentemente algum tipo de patrocínio formal (por exemplo, através de investimentos governamentais ou industriais). Considerando risco relativamente alto e longo prazo de desenvolvimento, é menos provável que financiamento no TRL 3 ou abaixo esteja disponível na maioria das fontes de financiamento de risco.

#### TRL 4 - Validação de componente e/ou "placa de ensaio" em ambiente laboratorial

No estágio de maturação tecnológica conhecido como *Technology Readiness Level* (TRL) 4, realiza-se a validação de componentes e/ou protótipos em ambiente laboratorial. Após o sucesso do trabalho "*proof-of-concept*", os elementos tecnológicos básicos devem ser integrados para estabelecer que as peças funcionarão em conjunto para alcançar níveis de desempenho que viabilizem o conceito, seja para um componente e/ou protótipo. Essa validação deve ser projetada para apoiar o conceito formulado anteriormente e deve ser consistente com os requisitos de potenciais aplicações do sistema. A validação apresenta, relativamente, "baixa fidelidade" em comparação com o sistema final, podendo ser composta por componentes discretos *ad hoc* em um laboratório. Mankins (1995) menciona que uma demonstração TRL 4 de uma nova abordagem de lógica difusa poderia consistir no teste dos algoritmos em uma demonstração parcialmente baseada em computador, parcialmente em bancada (por exemplo, giroscópios de fibra óptica) em um laboratório de controle usando entradas simuladas de veículo.

Os custos para atingir o TRL 4 são tipicamente de "baixos a moderados", representando, em geral, uma fração modesta dos custos de uma aplicação de sistema eventual envolvendo os conceitos e componentes testados. Novamente, esses custos tendem a ser em grande parte "específicos para a tecnologia", sendo provavelmente maiores (talvez várias vezes maiores) do que os investimentos necessários para atingir o TRL 3 no mesmo tópico. Tais atividades podem ser empreendidas por diversas organizações formais de P&D, mas, em razão dos custos crescentes, muito provavelmente envolveriam algum tipo de patrocínio formal (por exemplo, através de investimentos governamentais ou industriais). Considerando risco relativamente reduzido e menor prazo de desenvolvimento, é mais provável que o financiamento no TRL 4 ou superior possa, em casos apropriados, vir de diversos tipos de fontes de financiamento de risco.

#### TRL 5 – Validação de componente e/ou “placa de ensaio” em ambiente relevante

Quando um projeto de tecnologia atinge o *Technology Readiness Level* (TRL) 5, a validação do componente e/ou *breadboard* ocorre em um ambiente relevante, onde a fidelidade do sistema aumenta significativamente. Os elementos tecnológicos básicos são integrados a elementos de suporte razoavelmente realistas, permitindo que as aplicações totais (nível de componente, sub-sistema ou sistema) sejam testadas em um ambiente simulado ou semirrealista. Esta fase envolve o uso de novas tecnologias em demonstrações práticas.

Os custos para atingir o TRL 5 são geralmente moderados a altos, sendo específicos da tecnologia em questão e provavelmente superiores aos custos do TRL 4 na mesma área. Essas atividades são conduzidas por organizações formais de P&D, frequentemente com patrocínio governamental ou da indústria. No TRL 5, a tecnologia está pronta para estudos de design detalhados, apresentando incertezas moderadas, mas ainda representando um alto risco para o desenvolvimento e gerenciamento de engenharia. Em resumo, o TRL 5 marca um estágio em que a tecnologia está prestes a ser introduzida no ambiente operacional real, após demonstrar sua viabilidade e eficácia em condições mais próximas da aplicação final.

#### TRL 6 – Demonstração de modelo ou protótipo de sistema/subsistema em ambiente relevante

No sexto nível de maturidade tecnológica (TRL) 6, ocorre um avanço significativo na fidelidade da demonstração da tecnologia, seguindo o TRL 5. Nesse estágio, um modelo

ou protótipo representativo de um sistema ou subsistema, ultrapassando a abordagem *ad hoc* ou nível de componentes discretos, é testado em um ambiente relevante. No caso de tecnologias voltadas à exploração espacial, caso o único "ambiente relevante" seja o espaço, o modelo/protótipo deve ser demonstrado nesse ambiente, sendo esse requisito essencial para um TRL 6 autêntico. Nem todas as tecnologias passarão por essa demonstração, visto que, nesse ponto, o avanço na maturação é mais impulsionado pela garantia de confiança da gestão do que pelos requisitos de P&D. A demonstração pode representar uma aplicação real do sistema ou apenas ser semelhante à aplicação planejada, mas usando as mesmas tecnologias.

Nesse nível, novas tecnologias podem ser integradas à demonstração, como exemplificado por Mankins (2009) a respeito de uma abordagem inovadora para radiadores de alta temperatura/baixa massa. Essa abordagem seria demonstrada no TRL 6 voando um modelo de trabalho em escala sub-real, mas escalável, do sistema em um ônibus espacial ou na Estação Espacial Internacional. O espaço é o ambiente relevante em razão dos efeitos microgravitacionais, ao vácuo e ao ambiente térmico que ditarão o sucesso/fracasso do sistema, validando a tecnologia apenas no espaço. Os custos para atingir o TRL 6 são específicos da tecnologia e da demonstração, sendo uma fração do TRL 7 se em solo e quase os mesmos se o espaço for necessário. Essas atividades são geralmente conduzidas por organizações formais de P&D, envolvendo patrocínio governamental, da indústria ou financiamento de risco, considerando os custos significativamente elevados. No TRL 6, a tecnologia está pronta para estudos de design detalhados, apresentando incertezas aceitáveis. Em resumo, o TRL 6 é um estágio avançado no qual a tecnologia está sendo testada em situações operacionais reais, representando um passo crucial em direção à implementação prática.

#### TRL 7 – Demonstração de protótipo de sistema em ambiente real

O atingimento do *Technology Readiness Level* (TRL) 7, implica num avanço significativo além do TRL 6, exigindo a demonstração real de um protótipo de sistema em um ambiente real. Essa etapa nem sempre foi implementada no passado, sendo reservada para casos em que a aplicação da tecnologia ou do subsistema é crítica para a missão e apresenta riscos consideráveis. A demonstração deve envolver um protótipo próximo à escala do sistema operacional planejado, ocorrendo no próprio ambiente operacional esperado, como o espaço, se for o caso da NASA. Mankins (2009) cita como exemplos o *Mars Pathfinder Rover* e os *X-vehicles*, ambas demonstrações de tecnologia no nível TRL 7.

Os custos para atingir o TRL 7 são consideráveis, normalmente já atingindo uma fração significativa dos custos totais de desenvolvimento do sistema final. Essas atividades, que envolvem a construção e operação de unidades de engenharia de alta fidelidade, integradas a ambientes operacionais reais, só podem ser realizadas por organizações formais de projeto e sempre exigem patrocínio formal de governos, indústrias ou financiamento de risco considerando os custos substancialmente elevados. No TRL 7, a tecnologia é demonstrada através de protótipos de sistema em pleno funcionamento, capazes de lidar com todos os problemas críticos, resultando em dados de teste realísticos que validam seu uso com confiança em aplicações diferentes, ainda que rebaixando para um possível TRL 6. Este nível representa uma fase avançada de maturidade.

#### TRL 8 – Sistema completo e qualificado para aplicação por meio de testes a demonstrações

O Technology Readiness Level (TRL) 8, representa o alcance do ápice no desenvolvimento de sistemas reais, representando a conclusão do ciclo de desenvolvimento para a maioria dos elementos tecnológicos. Por definição, todas as tecnologias aplicadas em sistemas reais passam por TRL 8, indicando a conclusão efetiva do desenvolvimento do sistema. Exemplos incluem a integração bem-sucedida de uma nova tecnologia em um sistema existente.

Os custos associados a atingir o TRL 8 são específicos para a sua aplicação e os requisitos funcionais do novo sistema, mas tendem a ser muito elevados, muitas vezes superando em 5 a 10 vezes os custos combinados de todos os níveis anteriores de TRL. Esses custos, geralmente maiores que os investimentos para alcançar o TRL 6 na mesma área, são sustentados por organizações de projeto altamente formais e exigem patrocínio formal, seja do governo, da indústria ou de financiamento de risco, dada a magnitude dos custos envolvidos. O TRL 8 marca o estágio em que o sistema finalizado é demonstrado com sucesso em sua configuração final, validado por testes e análises em seu ambiente operacional pretendido, seja terrestre, aéreo ou espacial.

#### TRL 9 – Sistema “aprovado para utilização” por meio de aplicações exitosas

O último estágio de maturidade tecnológica da escala oficial, o *Technology Readiness Level* (TRL) 9 é atingido quando um sistema real é comprovadamente bem-sucedido em operações de missão. De acordo com Mankins (1995), todas as tecnologias que vêm a ser aplicadas em sistemas reais, necessariamente, atingiram o TRL 9, estágio de

desenvolvimento no qual são realizados os últimos aspectos de correção de falhas em relação ao sistema final de operação. Isso pode incluir ajustes ou mudanças para abordar problemas identificados após o lançamento, geralmente durante um período de cerca de "30 dias" após este. O autor cita como exemplo real deste caso a integração de uma nova ferramenta de inteligência artificial no controle operacional de missão no Centro Espacial Johnson da NASA. A principal distinção entre os TRLs 8 e 9 reside nas operações; enquanto a construção de uma nova aeronave ou espaçonave é classificada como TRL 8, o lançamento e a operação durante uma missão real se enquadram em TRL 9. Vale ressaltar que este estágio geralmente não inclui melhorias planejadas do produto para sistemas em andamento ou reutilizáveis.

Os custos associados ao alcance do TRL 9 são específicos para a aplicação e costumam ser consideráveis, embora geralmente significativamente menores do que os custos do TRL 8, que abrange o desenvolvimento completo do sistema. Essas atividades são normalmente conduzidas por uma organização formal de "missão" ou "operações". Em resumo, o TRL 9 representa o estágio em que a tecnologia atingiu a completa maturidade e foi implementada com sucesso em aplicações operacionais do mundo real, estando pronta para uso em larga escala.

O infográfico abaixo (Figura 9) produzido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sintetiza as descrições acima, de forma a facilitar sua compreensão geral.



**Figura 9 - Síntese dos níveis de maturidade TRL**

Fonte: Pierro (2019)

### 2.2.3. Disseminação da Escala TRL

Tendo demonstrado sucesso em seu propósito, a escala TRL foi implementada inicialmente na NASA e posteriormente no *Air Force Research Laboratory* que ao utilizá-

la fez pequenas adaptações para enquadrá-la no âmbito tecnológico da aviação (BANKE, 2010). Porém, em 1999 um estudo do *United States General Accounting Office* (GAO) projetaria essa tecnologia de gestão para muito além dessas duas organizações.

De acordo com GAO (1999), o Departamento de Defesa americano (DOD) programava para o ano de 2001 um aumento de cerca de 40% no orçamento destinado ao desenvolvimento de armamentos. Esta apreciação financeira estava associada a algumas contrapartidas como: a produção de armamentos melhores, mais baratos que seus antecessores e desenvolvidos em metade do tempo, o que não seria viável se fossem aplicados os processos de desenvolvimento tradicionais. Com o propósito de atender a essa expectativa do DOD, o GAO produziu um relatório de nome “*Better Management of Technology Development Can Improve Weapon System Outcomes*” onde mostrava que a maturação adequada dos componentes tecnológicos a serem incorporados em um produto final era determinante para a obtenção de melhores resultados nos programas de desenvolvimento de armas. Nesse estudo o GAO usou como referência de aferição de maturidade tecnológica a escala TRL e concluiu que as tecnologias incorporadas com mais sucesso apresentavam um TRL mínimo de 6, sendo que, mais comumente, tinham TRL 8 ou 9. Ao final do documento, o GAO recomendou que o DOD adotasse em suas agências algum método de aferição de maturidade tecnológica como o próprio TRL, de maneira que o Departamento somente subscrevesse à incorporação de uma dada tecnologia se seus componentes-chave atingissem altos graus de maturidade (GAO, 1999).

Após a divulgação do relatório, seguindo a recomendação do GAO, o DOD incorporou em seus processos de compra a aferição de maturidade tecnológica por meio da Escala TRL com o propósito de reduzir incertezas e custos no desenvolvimento de armamentos. Assim também o fizeram o Departamento de Segurança Nacional americano (*Department of Homeland Security*) e o Departamento de Energia americano (*Department of Energy*) (ALEXANDER, 2018). A repercussão dessas adesões entre os diversos órgãos governamentais levou à ampla adoção da Escala TRL por uma variedade de atores externos envolvidos no processo de desenvolvimento tecnológico. Esse fenômeno resultou na expansão da aplicação da escala TRL além do âmbito governamental, conquistando espaço significativo entre parceiros do setor privado envolvidos no desenvolvimento tecnológico. Esse desenvolvimento desempenhou um papel crucial na disseminação e aceitação mais ampla da escala TRL.

A crescente adesão fez com que a escala atravessasse o oceano e ganhasse espaço também na Europa por meio de sua agência espacial. A esse respeito Héder (2017) menciona que a *European Space Agency* (ESA) adotou a escala TRL em meados dos anos 2000 por meio da publicação de um manual intitulado “*Technology Readiness Handbook for Space Applications*”. O documento teve como propósito definir cada um dos níveis de maturidade tecnológica e orientar seus usuários europeus em relação ao processo de aferição da maturidade tecnológica (ESA, 2008). Apesar de replicar o conceito de TRL desenvolvido pela NASA e até suas representações gráficas da escala, curiosamente, o manual europeu praticamente não menciona a agência espacial americana no teor do documento.

Outro marco da disseminação da escala TRL foi a confecção da Norma ISO 16290:2013 denominada “*Space Systems – Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment*” que versa sobre os critérios de aferição de maturidade tecnológica. No documento a organização faz uma breve descrição e exemplos de cada um dos níveis de maturidade tecnológica, seguindo a mesma lógica dos 9 níveis de TRL preconizada pela NASA.

Especificamente no Brasil, a Escala TRL também vem ganhando adeptos no setor público e privado, fato este evidenciado por meio de uma série de inserções no contexto nacional de desenvolvimento de tecnologias.

Primeiramente pode-se citar a disponibilização de uma norma nacional de aferição de maturidade tecnológica em 2015 por parte da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) materializada pelo documento NBR ISO 16290:2015. Esta pesquisa não conseguiu acesso à norma, porém Jesus e Chagas Jr. (2017) relatam que seu teor corresponde a uma tradução da norma internacional ISO 16290:2013 referenciada anteriormente.

Outro ponto significativo da adesão do TRL por parte de organizações brasileiras consiste na criação de um guia de boas práticas para compras públicas que envolvam ETECs (encomendas tecnológicas) (RAUEN e BARBOSA, 2019). Neste documento publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada (IPEA), os autores utilizam a escala TRL como uma aproximação de nível de risco, sob a argumentação de que, à medida que o TRL de um projeto se eleva o nível de incerteza acerca de seu sucesso reduz. Dessa forma, sendo o risco tecnológico uma pré-condição para a configuração de uma ETEC, de acordo

com o Decreto nº9.283 de fevereiro de 2018, os autores estabelecem que só podem ser relacionados como ETECs projetos de desenvolvimento tecnológico que objetivem atingir do TRL 2 ao TRL 8.

Nesse mesmo ano da publicação do Decreto nº 9.283, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), reconhecida como um importante agente de inovação nacional, incorporou formalmente a utilização da escala TRL/MRL (*Technology Readiness Levels/Manufacturing Readiness Levels*) em seus procedimentos. De acordo com a organização, essa adoção refletiu sua compreensão de que a aplicação da escala TRL/MRL possibilita o acompanhamento de ativos tecnológicos ao longo das fases de pesquisa e viabiliza a comparação direta entre esses ativos. A empresa ainda acrescenta que a escolha por essa metodologia se deve à sua linguagem universal, que facilita a compreensão, tanto de gestores, quanto de equipes internas e parceiros externos acerca da verdadeira fase de desenvolvimento de cada ativo, assim como dos esforços necessários para sua conclusão e disponibilização para os públicos-alvo. Nesse contexto, a Embrapa entende que a escala TRL/MRL desempenha um papel fundamental na gestão dos resultados da pesquisa e no *pipeline* de ativos, ao mesmo tempo em que amplia as oportunidades de negócios e favorece a transferência de tecnologias (EMBRAPA, 2022).

Um marco significativo nesse processo de internalização da Escala TRL no ecossistema de inovação nacional foi a promulgação da Portaria MCTI 6499/22, a qual estabeleceu a utilização de uma métrica para a avaliação da maturidade tecnológica dos projetos de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) com base na Escala TRL (BRASIL 2022). Essa iniciativa foi liderada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) com o propósito de avaliar a maturidade tecnológica dos projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação vinculados ao MCTI, proporcionando diferenciais estratégicos na avaliação, execução de ações e alocação de recursos. Sua materialização se reflete na disponibilização de uma calculadora de maturidade tecnológica denominada “Calculadora TRL” que, por meio de 149 perguntas de múltipla escolha, classifica a iniciativa em análise de acordo com a Escala TRL.

Outros importantes agentes públicos brasileiros no âmbito da inovação, como a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII), o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), também incorporaram a Escala TRL em seus processos. Nessas organizações, a utilização dessa escala tem como finalidade a definição de políticas de investimento,

com a segmentação de projetos candidatos a programas de financiamento e subvenção de acordo com o nível de maturidade atual e desejado por seus idealizadores. Essa abordagem visa aprimorar a tomada de decisões estratégicas, proporcionando uma análise mais criteriosa e eficaz dos projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação, alinhando os recursos disponíveis com as metas de maturidade tecnológica almejadas.

Em resumo pode-se dizer que, atualmente, a escala TRL encontra-se largamente disseminada tendo sido adaptada do âmbito aeroespacial norte-americano para uma grande variedade de outras indústrias e países. Seus ramos de atuação nessa nova configuração vão desde a defesa, energia e transportes até a infraestrutura e tecnologia em empresas como Google, Alstom e British Petroil (BP) etc. (OLECHOWSKI et al., 2015).

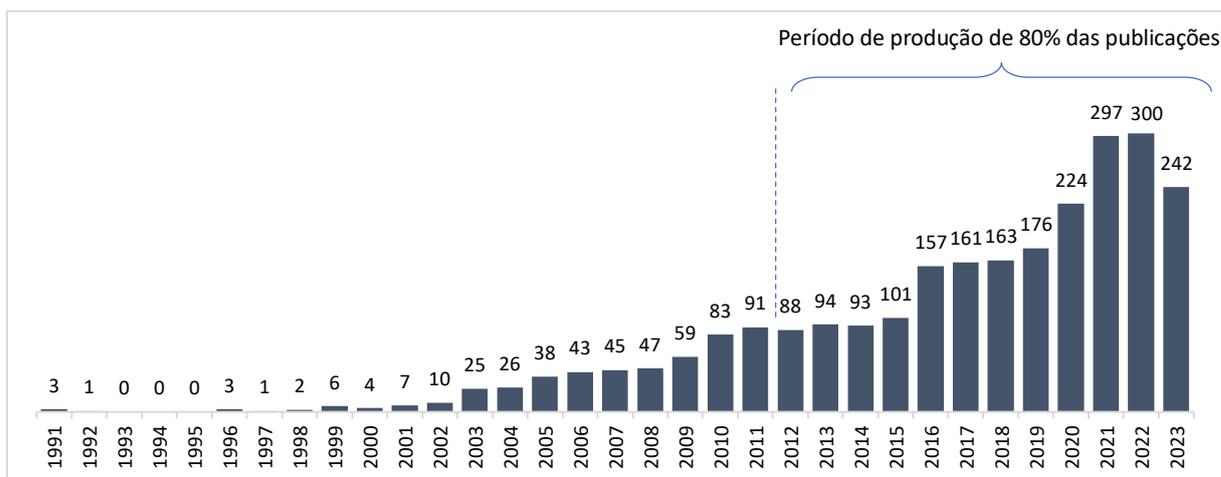
#### **2.2.4. A Escala TRL na literatura acadêmica**

No âmbito acadêmico, a escala TRL foi objeto de pesquisa em diversas áreas e acumulou nos últimos anos uma produção literária considerável. Com o objetivo de localizar o tema do TRL na literatura atual, foi conduzida uma pesquisa no mês de setembro de 2023 por meio da base de dados científicos Scopus Elsevier - que se mostrou a mais significativa em relação a essa temática - utilizando o termo de busca "*Technology Readiness Level*". A princípio, o termo foi procurado sem o auxílio de outros argumentos restritores com o objetivo de identificar as diferentes formas com que o TRL vem sendo aplicado na literatura de maneira geral. Como resultado desse processo, a ferramenta de busca da base Scopus procurou pelo termo escolhido no título, nas palavras-chave e no resumo dos documentos.

Os resultados dessa pesquisa serão analisados a seguir em termos de sua volumetria de produção por ano, autores, países, áreas temáticas e citações. Em seguida, as publicações com maior número de citações terão seu teor analisado em nível de resumo, de maneira a gerar uma melhor compreensão sobre quais temáticas estão atraindo mais atenção da comunidade acadêmica no que tange ao tópico *Technology Readiness Levels*.

A pesquisa gerou um total de 2.607 publicações que, em termos de ano de publicação, distribuem-se de acordo com o Gráfico 2.

**Gráfico 2 - Publicações com o termo “Technology Readiness Level” por ano – 1991 a 2023**



Fonte: Scopus Elsevier (set23)

A análise do gráfico, representando a quantidade de publicações de acordo com a Base Scopus, revela que as primeiras contribuições registradas remontam ao ano de 1991. Entre os anos de 1993 e 1995, observa-se um hiato de trabalhos científicos nesse âmbito, no entanto, a partir de 1996, constata-se uma notável retomada e um subsequente crescimento constante na produção de pesquisas. Destaca-se o ano de 2022 como o de maior volume de publicações até o momento desta análise, totalizando 300 trabalhos. Considerando o padrão ascendente de publicações, aproximadamente 80% do conjunto total de registros (cerca de 2.086) concentra-se no intervalo temporal entre 2012 e a data presente. Esse cenário evidencia a crescente importância atribuída a essa ferramenta de gestão tecnológica por pesquisadores e instituições dedicadas à pesquisa e inovação.

No que diz respeito à frequência de publicações, o Quadro 2 destaca os autores mais prolíficos, apresentando seus nomes e a quantidade de produções anuais de forma quantitativa.

**Quadro 2 - Quantidade de publicações dos Top 15 autores de maior produção científica com a temática TRL por Ano de publicação – 1991 a 2023**

#	Publicações Autor	Ano de Publicação 2000 e...														Total				
		23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	12	11	10	09		08	07	06	05
1	Viola N.		2	2	1		2	3	1											11
2	Sauser B.J.							1			1	1	2	1	3	2				11
3	Fusaro R.		2	2	1		2	3	1											11
4	Rodrigo M.A.	2	2	5		1														10
5	Sutliff D.L.			3		3	1	1	1											9
6	Wang J.	1		1					3	1		1							2	9
7	Stahl H.P.		1		1	1	1	1	2	1							1			9
8	Wang Y.		1	2		1	1	1				1	1							8
9	Liu J.	1		1	2	2			1				1							8
10	Udugama I.A.			2	1	3	1	1												8
11	Li X.	1	1		1	2				2	1									8

Publicações		Ano de Publicação 2000 e...																		
#	Autor	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	12	11	10	09	08	07	06	05	Total
12	Pichon T.											1		1	1	1		3	1	8
13	Mansouri S.S.			1	2	3	1	1												8
14	Boretti A.	3	1	4																8
15	Nakazono B.				1	2	1	2	2											8
	<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>134</b>

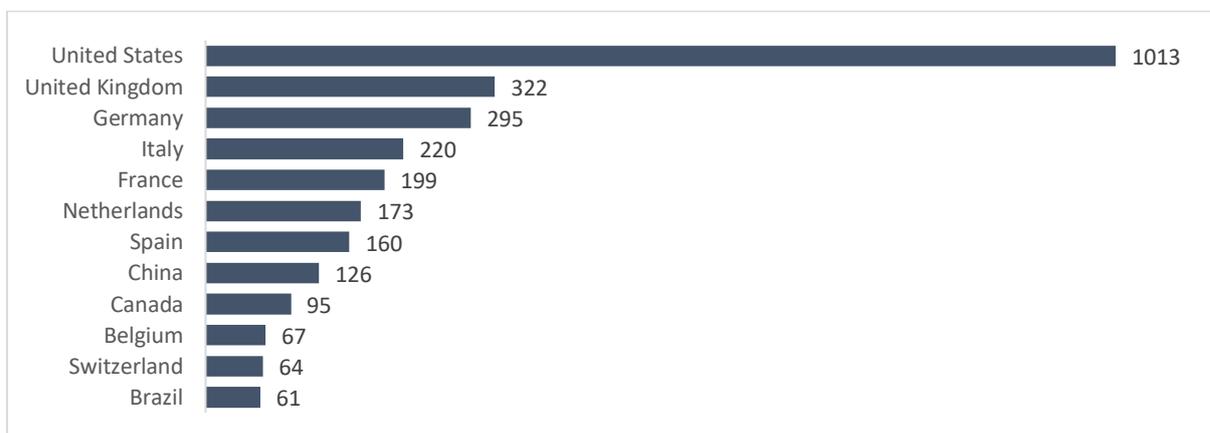
Fonte: Scopus Elsevier (set23)

Embora algumas das publicações mais antigas desses autores remontem ao ano de 2005, a maior parte iniciou sua produção no campo temático a partir de 2016, período este que concentra cerca de 77,6% desses 134 trabalhos. Essa constatação reforça a notável ascensão do tema na contemporaneidade, mesmo este tendo surgido no início dos anos noventa.

A análise revela que os quinze autores mais prolíficos acumulam um total de 134 trabalhos desde 2005 até hoje. Vale ressaltar que esse número não pode ser comparado diretamente em relação ao cômputo geral, uma vez que nele existem autores que colaboraram nas mesmas pesquisas. Tal fato gera intercessões nesse quantitativo, fazendo com que este não possa ser considerado como trabalhos independentes, ou seja, 134 pesquisas distintas. Esse é o caso de Viola N. e Fusaro R. que colaboraram em conjunto nas 11 publicações realizadas no intervalo de 2016 a 2022. A principal temática abordada por esses autores tem sido a do "*technology roadmapping*," que, segundo os autores, consiste em uma forma de planejamento tecnológico dinâmico onde o TRL se apresenta como uma das referências para o planejamento (ALEINA S.C. et al., 2016). No tocante ao fluxo de produção destaca-se também Sauser B.J. que, assim como Viola N. e Fusaro R., possui 11 trabalhos publicados. Com suas contribuições de 2008 a 2017, Sauser B.J. figura como um dos autores mais relevantes apesar de não apresentar novos trabalhos desde 2018. Suas publicações concentram-se na temática de aferição de maturidade de sistemas. Outro autor que, apesar de não estar no topo das maiores produções deste quadro, mostra-se notável é Boretti A. O autor, mesmo com produções independentes iniciadas em 2021, integra esse grupo com uma média de 2,7 artigos por ano produzidos nos últimos três anos. Ao contrário dos autores anteriormente destacados, as obras de Boretti A. estão voltadas para a geração de energia renovável, utilizando a Escala TRL como referência para a avaliação da maturidade tecnológica de seus projetos específicos.

Já no que tange à produção por região geográfica, as 2.607 publicações respondem por um total de 3.852 contagens de nacionalidade dos respectivos autores. o Gráfico 3 apresenta a distribuição dos 12 países com maiores contribuições.

**Gráfico 3 - Top 12 maiores países produtores de publicações envolvendo a temática TRL – 1991 a 2023**



Fonte: Scopus Elsevier (set23)

O gráfico evidencia a predominância da produção acadêmica dos Estados Unidos sobre a temática, alinhando-se ao que foi constatado pela revisão de literatura, uma vez que a origem e disseminação da ferramenta ocorreram a partir desse país. Desse modo, observa-se que os Estados Unidos concentram cerca de 26,3% das ocorrências. Posteriormente, observamos que o Reino Unido, Alemanha, Itália, França, Holanda e Espanha, embora individualmente estejam abaixo dos Estados Unidos, conjuntamente respondem por 1.369 publicações, evidenciando a representatividade atual dessa parte do bloco europeu, que já ultrapassa a produção norte-americana. A China também se destaca como um dos principais produtores, porém ocupa a 8ª posição, seguida pelo Canadá em 9ª. Bélgica e Suíça, em seguida, reforçam a produção europeia, e o Brasil ocupa a 12ª posição, contribuindo com um total de 61 publicações.

No que tange às temáticas de trabalho nas quais o TRL vem sendo aplicado, o Quadro 3 aponta o número de ocorrências observadas até esta data e sua respectiva porcentagem relativa.

**Quadro 3 - Distribuição do volume de produção de publicações científicas envolvendo a temática TRL por Área de trabalho – 1991 a 2023**

Área	Ocorrências	%	Área	Ocorrências	%
1. Engineering	1767	30,41%	15. Decision Sciences	60	1,03%
2. Physics and Astronomy	571	9,83%	16. Agricultural and Biological Sciences	48	0,83%

Área	Ocorrências	%	Área	Ocorrências	%
3. Energy	531	9,14%	17. Economics, Econometrics and Finance	37	0,64%
4. Earth and Planetary Sciences	501	8,62%	18. Health Professions	23	0,40%
5. Computer Science	476	8,19%	19. Multidisciplinary	22	0,38%
6. Materials Science	412	7,09%	20. Immunology and Microbiology	19	0,33%
7. Environmental Science	311	5,35%	21. Psychology	8	0,14%
8. Mathematics	291	5,01%	22. Arts and Humanities	5	0,09%
9. Chemical Engineering	188	3,24%	23. Pharmacology, Toxicology and Pharmaceutics	5	0,09%
10. Business, Management and Accounting	136	2,34%	24. Nursing	4	0,07%
11. Chemistry	136	2,34%	25. Neuroscience	3	0,05%
12. Social Sciences	101	1,74%	26. Dentistry	1	0,02%
13. Medicine	85	1,46%	27. Veterinary	1	0,02%
14. Biochemistry, Genetics and Molecular Biology	68	1,17%	<b>Total</b>	<b>5810</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: Scopus Elsevier (set23)

A análise do Quadro 3 permite observar a grande variedade de assuntos nos quais a Escala TRL tem sido aplicada, abrangendo, até o momento, vinte e sete distintas áreas de estudo. Naturalmente, áreas correlatas com as ciências espaciais, como Engenharia; Física e Astronomia; Terra e Ciências Planetárias tendem a demonstrar maior representatividade, em função desta ter sido o tópico inaugural dos estudos de maturidade tecnológica. Desse modo, essas áreas ocupam, respectivamente, a primeira, segunda e quarta posições que, conjuntamente somam cerca de 48,9% das ocorrências. Outra área que vem ganhando destaque no que tange ao uso da Escala TRL é a de Energia que se encontra na terceira colocação atual de acordo com o Quadro 3.

Em sua maioria, as áreas de interesse que utilizam a Escala TRL encontram-se no ramo das ciências exatas que consistem das 11 primeiras colocações na tabela e somadas totalizam cerca de 91,6% das ocorrências. Porém, o caráter multidisciplinar desta ferramenta tem feito com que pesquisadores atuantes nas áreas de ciências humanas também a utilizem, ampliando seu escopo de atuação. Tal afirmação pode ser constatada pela existência de pesquisas em áreas como Ciências Sociais; Medicina; Bioquímica, Genética e Biologia Molecular entre outras que, embora ainda não apresentem um percentual significativo frente às áreas relacionadas às ciências exatas, já figuram como campos de interesse para aplicação da Escala TRL.

Por fim, a última métrica a ser explorada nesta seção refere-se aos trabalhos com o maior número de citações. Considerando a extensa produção observada e a diversidade de temas abordados, o propósito dessa análise é compreender quais desses trabalhos têm despertado maior interesse na comunidade acadêmica. Dessa forma, busca-se identificar

o perfil das pesquisas que têm gerado maior impacto e recebido maior reconhecimento por meio de citações.

De acordo com a Base Scopus, os trabalhos que abordam a temática em voga totalizam 34.416 citações correspondentes a 1.876 publicações citadas. O Quadro 4 apresenta o título dos quinze trabalhos mais citados com seus respectivos quantitativos de citações, autores, ano de publicação e forma de uso do TRL.

**Quadro 4 - Top 15 artigos que envolvem a temática TRL com os maiores números de citações – Por Título, Citações, Autores, Ano de Publicação e Forma de uso do TRL - 1991 a 2023**

#	Título	Citações	Autores	Ano de publicação	Uso do TRL
1	A review of morphing aircraft	1.096	Barbarino S.; Bilgen O.; Ajaj R.M.; Friswell M.I.; Inman D.J.	2011	Os autores utilizam a Escala TRL como referência para avaliar o grau de maturidade tecnológica de asas morfáveis em aeronaves. Os autores destacam a baixa prontidão tecnológica de muitos dos conceitos desenvolvidos, devido a preocupações com custo, complexidade e peso
2	Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys	611	Gorsse S.; Hutchinson C.; Gouné M.; Banerjee R.	2017	Os autores utilizam o TRL como referência de maturidade tecnológica de três diferentes ligas metálicas para ilustrar suas características microestruturais específicas, tendo em vista que são produzidas pelo processo de Manufatura Aditiva (MA)
3	Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review	557	Li Y.; Liu K.; Foley A.M.; Zülke A.; Bercibar M.; Nanini-Maury E.; Van Mierlo J.; Hoster H.E.	2019	Os autores usam o TRL como referência do grau de maturidade tecnológica de diferentes processos, orientados por dados, de estimativa da saúde e longevidade de baterias de lítio.
4	Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges	478	Leitão P.; Colombo A.W.; Karnouskos S.	2016	Os autores ressaltam a importância de elevar o TRL de Sistemas Ciber-Físicos para sua aplicação em ambientes industriais de automação e para tal identificam desafios-chave com base na experiência de outros projetos de inovação.
5	Smart homes and home health monitoring technologies for older adults: A systematic review	410	Liu L.; Stroulia E.; Nikolaidis I.; Miguel-Cruz A.; Rios Rincon A.	2016	Os autores avaliam o TRL de tecnologias voltadas a casas inteligentes e monitoramento de saúde domiciliar para idosos. Concluem que o TRL dessas tecnologias é baixo, destacando a necessidade de avanços para melhor atender às necessidades complexas dos idosos em seus lares.
6	Technology readiness assessments: A retrospective	384	Mankins J.C.	2009	O autor destaca a importância do TRL para o desenvolvimento bem-sucedido de capacidades de sistemas, ressaltando o fato de que o TRL consiste em uma métrica eficaz para avaliar e comunicar a maturidade de novas tecnologias, influenciando a gestão de projetos e mitigando riscos.
7	Molecularly Imprinted Polymers in Electrochemical and Optical Sensors	368	Ahmad O.S.; Bedwell T.S.; Esen C.; Garcia-Cruz A.; Piletsky S.A.	2019	Os autores utilizam o TRL para avaliar o grau de maturidade tecnológica de sensores baseados em polímeros de impressão molecular (MIP).

#	Título	Citações	Autores	Ano de publicação	Uso do TRL
8	Analysis and status of post-combustion carbon dioxide capture technologies	362	Bhown A.S.; Freeman B.C.	2011	Os autores utilizam a Escala TRL para analisar o estágio geral de desenvolvimento de 95 tecnologias de captura de CO <sub>2</sub> pós-combustão.
9	Trends in Microalgae Incorporation Into Innovative Food Products With Potential Health Benefits	335	Caporgno M.P.; Mathys A.	2018	Os autores propõem o aprimoramento do nível de prontidão tecnológica (TRL) como solução para os desafios relacionados ao processamento de microalgas em função de seus benefícios para a saúde humana.
10	Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review	326	Wang H.; Jasim A.; Chen X.	2018	Os autores utilizam o nível de prontidão tecnológica como uma das métricas de comparação de diferentes fontes de energia como células fotovoltaicas, coletores solares, energia geotérmica, termoelétricas, eletromagnéticas e piezoelétricas.
11	A review on commercial-scale high-value products that can be produced alongside cellulosic ethanol	305	Rosales-Calderon O.; Arantes V.	2019	Os autores utilizam a Escala TRL como referência do nível de prontidão tecnológica de produtos químicos e materiais utilizados na produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica. Os autores se focam na análise apenas desses produtos e materiais com TRL mínimo de 8, nível esse entendido pelos autores como adequado para comercialização.
12	High power density superconducting rotating machines - Development status and technology roadmap	282	Haran K.S.; Kalsi S.; Arndt T.; Karmaker H.; Badcock R.; Buckley B.; Haugan T.; Izumi M.; Loder D.; Bray J.W.; Masson P.; Stautner E.W.	2017	Os autores estruturam um planejamento tecnológico (technology roadmap) para desenvolvimento de máquinas supercondutoras, que tem por objetivo atingir um Nível de Prontidão Tecnológica de 6 ou mais para essas máquinas em 10 anos.
13	Control Strategies for Microgrids with Distributed Energy Storage Systems: An Overview	280	Morstyn T.; Hredzak B.; Agelidis V.G.	2018	Os autores utilizam a Escala TRL para avaliar o grau de maturidade tecnológica de estratégias de controle para armazenamento de energia em microrredes. No processo de análise os autores concluem que as estratégias analisadas possuem TRLs de 2 a 5, indicando o aspecto emergente dessa área de pesquisa.
14	A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy	273	Gherghel A.; Teodosiu C.; De Gisi S.	2019	Os autores utilizam o TRL como medida de referência para avaliação do grau de maturidade tecnológica de processos de tratamento de esgoto para geração de energia e recuperação de recursos, alinhado aos princípios da economia circular.
15	Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment	214	Solis M.; Silveira S.	2020	Os autores utilizam a Escala TRL para avaliar o grau de maturidade de oito tecnologias de reciclagem química para plásticos. Durante sua análise os autores destacam a pirólise, craqueamento catalítico e gasificação convencional como as mais avançadas.

A análise do Quadro 4 permite estabelecer alguns pontos de destaque acerca das publicações de maior impacto que abordam a Escala TRL, sendo o primeiro deles relacionado à idade dessas publicações. Apesar de haver uma considerável produção científica envolvendo a referida temática que se estende desde 1991 até os dias atuais, dentre as quinze mais citadas, somente três são anteriores a 2016. Dessa forma, observa-se que o tempo de disponibilidade de trabalhos com essa temática não aparenta ser uma variável de grande sensibilidade sobre o número de citações. De fato, observa-se que o trabalho mais citado se encontra entre os três mais antigos, porém, essa correlação não se mostra longeva, uma vez que os segundo e terceiro trabalhos mais citados são de 2017 e 2019, respectivamente. Um fato que pode explicar tal dinâmica consiste em uma possível perecibilidade associada a pesquisas que envolvam a temática TRL, tendo em vista que tecnologias passadas acabam por não ser mais referenciadas após sua substituição.

O segundo tem relação com os autores desses trabalhos. Ao comparar o rol de autores mais citados (Quadro 4) com a lista de autores que mais produziram trabalhos com essa mesma temática (Quadro 2) observa-se que não há intercessão entre esses dois grupos. Tal constatação pode significar que, apesar de contarem com um número significativo de publicações que envolvem a temática TRL, as produções desses autores não estão exercendo impacto no meio acadêmico proporcional à sua produção. Essa assunção acaba por ser verificada, uma vez que, em averiguação no registro geral extraído da Base Scopus, identifica-se que o pesquisador Wang Y. se mostra como o líder de citações dentre os maiores produtores com um trabalho de 2013 que apresenta 113 citações, número esse que o coloca na 46ª posição. Os autores número 1 em produção – Viola N.; Sauser B.J. e Fusaro R. –, em termos do número de citações de seus trabalhos mais referenciados, encontram-se nas posições 366ª, 117ª e 366ª, respectivamente.

A terceira e última observação sobre o Quadro 4 diz respeito à forma com que a ferramenta TRL é utilizada pelos autores em suas pesquisas. A análise qualitativa dos referidos textos mostrou que quase a totalidade dos trabalhos de maior impacto literário que envolvem a temática TRL fazem uso da ferramenta sob seu aspecto instrumental, ou seja, como padrão de referência para aferição do grau de maturidade tecnológica, atual ou desejado, de variados tipos de projetos. Contudo, dado que o sucesso de um projeto tecnológico pode ser influenciado por uma combinação de elementos sujeitos a variações ao longo do tempo, a referida constatação denota certo desinteresse dos estudiosos do tema em relação a estudos que abordem a temática sob uma perspectiva longitudinal. Dessa maneira, se por um lado o volume de citações materializa a forte adesão que a Escala TRL obteve junto à comunidade científica e ao setor

privado como um instrumento de avaliação de maturidade, por outro demonstra como o estudo do aspecto dinâmico dessa tecnologia de gestão parece não ter alcançado projeção significativa na literatura. Nesse sentido, apesar da riqueza potencial existente em relação ao estudo dos fluxos transitórios entre os graus de maturidade tecnológica, observa-se que a Escala TRL se consolidou junto à comunidade científica como um instrumento estático de classificação de projetos de tecnologia.

Contudo, enquanto essa observação se aplica ao perfil genérico de busca utilizado nesta primeira pesquisa (conforme mencionado no início desta seção). Uma abordagem mais direcionada, sobre a mesma base, buscando identificar trabalhos que exploraram, especificamente, lacunas na gestão de portfólios de projetos de P&D utilizando a dinâmica da Escala TRL, revela algumas contribuições específicas sobre esse aspecto. Esses estudos serão examinados em maiores detalhes na seção subsequente para uma compreensão mais aprofundada.

### 2.2.5. Lacunas exploradas

Os argumentos colocados nos parágrafos anteriores mostram como a escala TRL exerceu impacto significativo sobre o universo governamental, corporativo e acadêmico no que tange ao desenvolvimento e gestão de tecnologias, tendo se consolidado como uma referência nesses ambientes. Ainda assim, os sucessivos estudos e utilizações desse método de gestão pelas mais diversas organizações revelaram oportunidades de melhoria e lacunas deste método de aferição de maturidade tecnológica. Nesse sentido, Tomaschek et al., (2016) fizeram um levantamento abrangente na literatura acerca do trabalho de outros pesquisadores do tema que abordaram tais lacunas. A síntese desse apanhado pode ser vista no Quadro 5 a seguir:

**Quadro 5 - Desafios relacionados ao método TRL de acordo com a literatura**

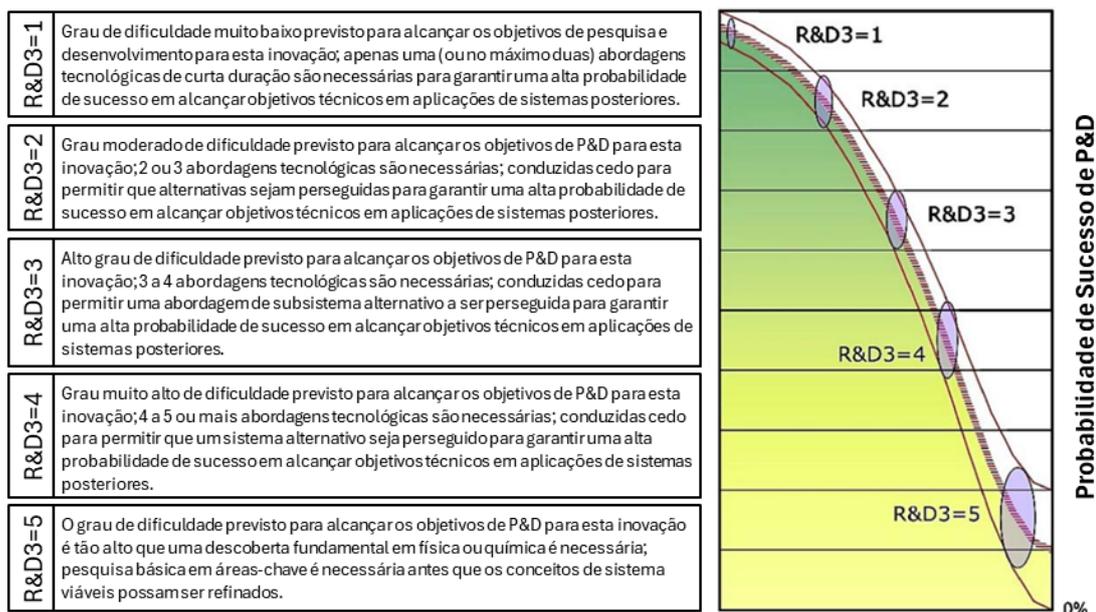
<b>Desafio</b>	<b>Fonte</b>
1. a necessidade de uma visão sistêmica da maturidade tecnológica que capture a prontidão da integração	(Mankins 2002; Valerdi e Kohl 2004; Bilbro 2007; Azizian et al. 2011; Holt e Beasley 2011; Jimenez e Mavris 2014)
2. a falta de orientação sobre a probabilidade de maturação de tecnologias por meio da escala TRL	(Smith 2004; Cornford e Sarsfield 2004; Mankins 2002)
3. a interpretação subjetiva da maturidade de uma tecnologia	(Mahafza 2005; Cornford e Sarsfield 2004)
4. o forte foco em aplicações de hardware	(Smith 2004)
5. a falta de integração nos modelos de custos e riscos	(Mankins 2009; Valerdi e Kohl 2004)

<b>Desafio</b>	<b>Fonte</b>
6. a subjetividade na interpretação das descrições individuais do TRL	(Cornford e Sarsfield 2004)
7. a falta de uma diretriz explicando como implementar a avaliação do TRL	(Azizian, Sarkani e Mazzuchi 2009)

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Tomaschek et al., (2016)

Apesar da riqueza exploratória inerente à investigação das variadas limitações identificadas no trabalho de Tomaschek et al., (2016), esta seção concentra seus esforços sobre o Desafio 2: “a falta de orientação sobre a probabilidade de maturação de tecnologias por meio da escala TRL”, tendo em vista sua aderência com a temática principal desse estudo.

A respeito dessa lacuna, o primeiro trabalho a ser abordado é o de John C. Mankins, ex-integrante da NASA e autor do trabalho publicado em 1995 que popularizou a escala TRL de 9 níveis. Sobre a dinâmica evolutiva dos projetos, esse autor afirmou que “*se faz necessária uma medida que estime o grau de dificuldade esperado durante o processo de maturação tecnológica para complementar a tecnologia de gestão do TRL*” (MANKINS, 1998). Como proposta de tratamento para este desafio, o referido autor propôs a criação de uma nova métrica a qual ele denominou *Research and Development Degree of Difficulty* ou R&D<sup>3</sup>. Tal técnica consiste na atribuição de um grau de dificuldade esperado para o atingimento dos objetivos de P&D de uma dada tecnologia. Em termos de sua operacionalização Mankins (2002) afirma que a escala R&D<sup>3</sup> é composta por cinco graus de dificuldade pré-determinados que, por sua vez, estão associados a percepções qualitativas das equipes em relação às probabilidades de sucesso do projeto em questão. A escala R&D<sup>3</sup> em seu inteiro teor pode ser verificada na Figura 10.



**Figura 10 - Escala Research and Development Degree of Difficult (R&D<sup>3</sup>)**

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Mankins (2009)

Outro pesquisador que abordou esse mesmo desafio foi James W. Bilbro, tecnólogo chefe do *Marshall Space Flight Center* da NASA que, para tal, adotou como solução sua ferramenta denominada *Advancement Degree of Difficulty* ou AD<sup>2</sup>. Assim como o R&D<sup>3</sup>, o AD<sup>2</sup> utiliza uma escala com diversos níveis de dificuldade associados a percentuais de risco de desenvolvimento, juntamente com descrições predefinidas para orientar a classificação de uma tecnologia específica. Entretanto, esta abordagem difere de sua predecessora ao expandir os cinco níveis originalmente propostos por Mankins (1998) para nove, justificando essa ampliação pela necessidade de uma distinção mais precisa entre os níveis de dificuldade e pela maior conformidade dessa nova configuração com a estrutura padrão da Escala TRL. Além disso, a técnica de Bilbro (2006) expande o conceito do R&D<sup>3</sup> para uma abordagem de engenharia de sistemas, considerando em sua composição outras métricas derivadas da Escala TRL (TRL, IRL, SRL, MRL etc.) em um único processo abrangente (BILBRO, 2006). O Quadro 6 apresenta a relação dos níveis de dificuldade com suas respectivas probabilidades de risco de desenvolvimento e descrições. Já o Quadro 7 exhibe um exemplo de aferição do AD<sup>2</sup> aplicado aos sistemas, subsistemas e componentes de turbo máquinas.



desenvolvimento dos projetos, essas ferramentas ainda se mostram permeadas de empirismo. Tal colocação é corroborada por Olechowski et al., (2020) que em seu estudo reportam não haver, ainda, uma técnica metodológica para avaliação da probabilidade de progressão de uma tecnologia na escala TRL e que tais projeções, atualmente, são feitas de maneira empírica com base no “instinto” dos profissionais envolvidos. Héder (2017) também aborda o fato sobre uma outra perspectiva, afirmando não haver métricas de referência para as taxas médias de cancelamento de projetos de tecnologia por indústria específica e que a obtenção dessas seria um tópico de pesquisa desafiador.

Diante desta limitação, uma terceira e mais recente proposta de tratamento da problemática foi elaborada pelo pesquisador Jungmok Ma, professor associado da Universidade de Defesa Nacional da Coreia. Conforme destacado anteriormente neste trabalho, Ma (2021) também reconhece as limitações intrínsecas ao aspecto qualitativo das abordagens anteriores que podem introduzir vieses por parte da equipe de avaliação. Diante disso, propõe a criação de uma alternativa isenta de empirismo. Para tal, o autor desenvolve uma abordagem quantitativa que, com base em dados históricos, é capaz de identificar as variáveis independentes de maior significância na formação de futuros TRLs. Tendo essas variáveis como referência, gera-se, então, uma equação para obtenção dos TRLs futuros com base em modelos de regressão linear e processos estatísticos.

Particularmente em relação ao estudo de caso apresentado no trabalho do referido autor, que abrangeu uma base de dados composta por 172 projetos de tecnologia, concluiu-se que as variáveis “Custo de desenvolvimento” e “TRL inicial” demonstraram significância na predição do TRL futuro, com aderência de 60% pelo modelo matemático gerado. A abordagem de Ma (2021) inova ao tentar mitigar a possibilidade de vieses cognitivos presente em suas predecessoras por meio de uma abordagem orientada por dados. No entanto, ao estruturar sua resposta por meio de uma equação que depende de outras variáveis desconhecidas que devem ser estimadas pelas mesmas equipes de projeto, o autor acaba por retornar ao domínio do empirismo.

Uma análise da literatura com foco no desenvolvimento e gestão de tecnologias aponta que, embora a Escala TRL tenha alcançado uma notável visibilidade em diversos domínios científicos e mercadológicos, sua aplicação como instrumento de avaliação de riscos permanece impregnada de abordagens empíricas. Apesar do significativo volume de pesquisas dedicadas a aprimorar esse tema, há uma lacuna notável em termos de métricas referentes às taxas de progressão esperadas ao longo da escala TRL. Nesse sentido, a literatura destaca a

importância de desenvolver métodos mais robustos para mensurar o avanço nos níveis de prontidão tecnológica, contribuindo assim para a mitigação da subjetividade inerente à sua aplicação.

### **3. MÉTODO**

Esta seção apresenta a estruturação metodológica da pesquisa, com sua respectiva caracterização, métodos e instrumentos empregados para o seu desenvolvimento.

#### **3.1. Caracterização da Pesquisa**

Conforme abordado na seção introdutória, o presente trabalho tem por objetivo a proposição de um método quantitativo genérico de processamento e análise de registros históricos de TRL, que permita estabelecer referenciais probabilísticos acerca do comportamento evolutivo de projetos de um portfólio. Ante a essa proposta, conduziu-se uma pesquisa exploratória, descritiva e de caráter indutivo sobre os registros históricos de TRL de um portfólio de projetos, de modo a obter-se esses referenciais. Tendo em vista o sistema classificatório de Yin (2015), o presente trabalho pode ser considerado como um estudo de caso único com múltiplas unidades de análise. Único em razão da base de dados contemplar apenas uma organização e de múltiplos casos, uma vez que a unidade de análise consiste nos vários projetos de tecnologia dessa organização a terem seu fluxo de TRL investigado. No que tange à dimensão temporal, este estudo apresenta caráter longitudinal à medida que os referidos registros foram acompanhados ao longo de 23 meses, sendo este intervalo de tempo compreendido entre os meses de setembro de 2020 a julho de 2022.

#### **3.2. Delineamento da Pesquisa**

A referida base de trabalho foi coletada junto à organização-objeto mediante um processo de extração de dados realizado por meio da ferramenta de gestão de dados SQL. Importa ressaltar que, por questões de confidencialidade, a base de trabalho encontra-se totalmente desidentificada, de modo que a chave-primária dos projetos se constitui apenas em código alfanumérico ininteligível a pessoal externo à empresa.

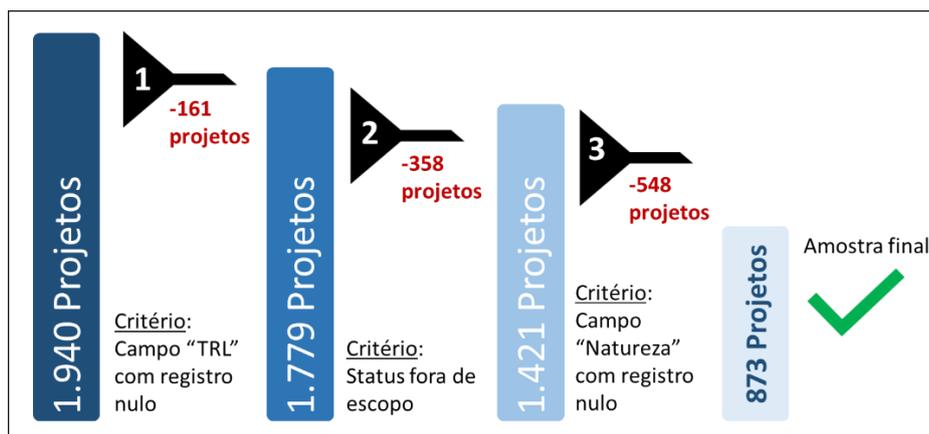
No que tange à dimensão temporal, este estudo utilizou um recorte longitudinal da base geral que compreendeu um período iniciado em setembro de 2020 estendido até julho de 2022. Tal recorte gerou um total de 44.609 registros, correspondentes a 1.940 projetos únicos de diferentes naturezas. Essa base de trabalho teve sua extração realizada no mês de julho de 2022 e contou com os campos:

- COD = Código de identificação do projeto (chave-primária)
- NATUREZA = Tipologia do projeto podendo esta ser “Software”, “Processo”, “Produto” ou “Estudo”
- DT\_REGISTRO = Data do registro em questão em formato “dd/mm/aaaa”
- TRL = Grau de maturidade tecnológica do projeto na data do registro
- STATUS = Status do projeto na data do registro podendo este ser “Em execução”, “Concluído” ou “Cancelado”

### **3.3. Composição da Amostra de Trabalho**

Em função do perfil específico da base de trabalho e do ineditismo metodológico desta pesquisa, não foram utilizados processos padronizados para a modelagem dos dados. Sendo assim, os próximos parágrafos desta seção foram dedicados a descrever, em detalhes, as intervenções de modelagem sobre a base bruta para formação da amostra de trabalho. Desta maneira, espera-se fornecer a futuros pesquisadores um passo a passo que permita a replicação deste mesmo processo de análise com dados de outras organizações, o que viabiliza a construção de referenciais comparativos em relação às métricas estabelecidas pela presente pesquisa. Todo o processo de tratamento dos dados da base foi feito por meio do software MS-Excel.

A formação da amostra de trabalho, inicialmente, ensejou a limpeza da base bruta composta por 1.940 projetos, de maneira a eliminar registros nulos e inadequados ao escopo de trabalho. Nesse sentido, foram aplicadas três etapas de filtragem conforme pode ser visto na Figura 11.



**Figura 11 - Processo de filtragem para composição da amostra de trabalho**

Fonte: Próprio autor

O primeiro critério de filtragem aplicado sobre a base bruta teve por objetivo eliminar registros que não apresentavam informação no campo “TRL”, retirando, dessa forma, 161 projetos. O segundo teve como propósito retirar projetos cujo campo “Status” estava fora do escopo de análise e essa operação excluiu outros 358 projetos. Por fim, foi aplicado um último filtro com o objetivo de excluir os registros com informação nula no campo “Natureza”. Essa última intervenção eliminou 548 projetos, levando a base final de trabalho a um total de 873 projetos que serão o objeto de análise desse estudo.

### 3.4. Processamento e modelagem dos dados

Findo o processo de filtragem, para a composição das métricas de fluxo de TRL, os 873 projetos pertencentes à amostra de trabalho passaram por um processo de reorganização estrutural, de modo a transformar seus registros históricos de TRL em Vetores de Transição. Para tal, primeiramente converteu-se a estrutura verticalizada original da base de dados primária em uma estrutura matricial composta pelos TRLs históricos mensais de cada projeto. A Tabela 1 materializa um extrato da referida matriz a título ilustrativo.

**Tabela 1 - Matriz de Evolução TRL (exemplo com oito projetos)**

	2020				2021								2022										
	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul
EV-00001	5	5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
EV-00002	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
EV-00003	2	2	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	7	7	7	8	9	9	9	9	9
EV-00004	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
EV-00005	1	1	3	3	3	3	3	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
EV-00006	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
EV-00007	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
EV-00008	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Fonte: próprio autor

A leitura da informação contida na Tabela 1 mostra que, por exemplo, o projeto EV-00003 teve sua maturidade tecnológica inicial avaliada como de nível 2 em setembro de 2020 e se manteve nessa classificação por dois meses. No terceiro mês, novembro de 2020, o projeto sofreu uma primeira reclassificação que o alçou ao TRL 4, estágio de maturidade no qual permaneceu por seis meses até atingir o TRL 5 em uma reavaliação conduzida em maio de 2021. Após esse progresso, a próxima transição se deu após seis meses quando o projeto atingiu o TRL 7 em novembro de 2021. O TRL 8, embora tenha demorado três meses para ser atingido (em fevereiro de 2022), foi superado em apenas um mês, quando, em março de 2022, o projeto sofre sua última transição de maturidade e é classificado com o TRL 9, o máximo da Escala TRL.

De posse dessa matriz, o segundo tratamento operado sobre cada dado foi a remoção do fator temporal<sup>3</sup>, uma vez que o foco da pesquisa se encontra restrito ao estudo das transições entre os níveis de TRL. Tal remoção implicou na aglutinação de TRLs adjacentes iguais em somente um registro, independentemente do tempo de permanência no referido nível. Após essa remoção foram então formados os pares de transição representados pela associação, dois a dois, dos TRLs adjacentes como pode ser visto na Tabela 2 a seguir. Cada linha dessa nova matriz formada gerou um Vetor de Transição que foi a base do estudo de fluxo TRL desta pesquisa.

**Tabela 2 - Matriz de Evolução TRL - número de transições - sem fator tempo (exemplo de 8 projetos)**

	1	2	3	4	5	6	7	8
EV-00001	5-9	9-9	-	-	-	-	-	-
EV-00002	2-4	4-4	-	-	-	-	-	-
EV-00003	2-4	4-5	5-7	7-8	8-9	9-9	-	-
EV-00004	6-8	8-8	-	-	-	-	-	-
EV-00005	1-3	3-9	9-9	-	-	-	-	-
EV-00006	3-4	4-5	5-6	6-6	-	-	-	-
EV-00007	1-2	2-4	4-4	-	-	-	-	-
EV-00008	6-7	7-8	8-9	9-9	-	-	-	-

Fonte: próprio autor

Ao analisar a Tabela 2 interpretativamente, destaca-se, por exemplo, que o projeto EV-00006 evidenciou três transições ao longo de seu ciclo de vida, materializadas pelos pares 3-4, 4-5 e 5-6. Isso sugere que o projeto iniciou com um TRL de nível 3, progredindo gradualmente na Escala TRL, nível a nível, até alcançar o nível 6 quando foi concluído. Já o projeto EV-00004,

<sup>3</sup> A eliminação do fator temporal nesta pesquisa foi deliberada, uma vez que o foco principal reside nas transições entre os diferentes níveis de TRL. No entanto, reconhece-se que o fator temporal é uma variável crucial para o processo de gestão tecnológica. Portanto, essa dimensão será abordada na seção de proposições para pesquisas futuras.

por sua vez, teve uma trajetória distinta, passando por apenas uma transição. Inicializando no TRL 6, o projeto avançou diretamente para o TRL 8, culminando em sua conclusão. Este caso indica uma progressão mais objetiva, com uma única mudança na classificação da maturidade tecnológica ao longo do ciclo de vida do projeto. Importante salientar que, ao contrário da disposição temporal na Tabela 1, a Tabela 2 não oferece informações sobre o momento específico em que essas transições ocorreram, sendo, portanto, uma versão simplificada da tabela anterior.

O último passo desse processo de tratamento dos dados brutos consistiu em quantificar cada uma das transições de TRL observadas nos Vetores de Transição. Essa quantificação foi feita por meio da contagem das diferentes combinações de transição que, de maneira a facilitar a visualização, foi alocada em uma matriz origem-destino. Sendo a Escala TRL composta por nove níveis, a combinação desses, dois a dois, revela oitenta e um pares de transição possíveis que tiveram seus quantitativos apurados com base na amostra de trabalho. De forma a tornar a visualização desses resultados mais eficiente e ergonômica, estes foram dispostos em formato de tabela em uma matriz quadrada 9 x 9 (nove por nove) denominada “Matriz de Transição TRL” (Tabela 3). O resultado da aplicação efetiva desse processo sobre a base de trabalho, materializado pela Matriz de Transição, poderá ser visto na seção de resultados deste documento.

**Tabela 3 - Matriz de Transição TRL - Genérica**

TRL de Origem (TRL <sub>O</sub> )	<b>9</b>	Qtd <sub>9→1</sub>	Qtd <sub>9→2</sub>	Qtd <sub>9→3</sub>	Qtd <sub>9→4</sub>	Qtd <sub>9→5</sub>	Qtd <sub>9→6</sub>	Qtd <sub>9→7</sub>	Qtd <sub>9→8</sub>	Qtd <sub>9→9</sub>
	<b>8</b>	Qtd <sub>8→1</sub>	Qtd <sub>8→2</sub>	Qtd <sub>8→3</sub>	Qtd <sub>8→4</sub>	Qtd <sub>8→5</sub>	Qtd <sub>8→6</sub>	Qtd <sub>8→7</sub>	Qtd <sub>8→8</sub>	Qtd <sub>8→9</sub>
	<b>7</b>	Qtd <sub>7→1</sub>	Qtd <sub>7→2</sub>	Qtd <sub>7→3</sub>	Qtd <sub>7→4</sub>	Qtd <sub>7→5</sub>	Qtd <sub>7→6</sub>	Qtd <sub>7→7</sub>	Qtd <sub>7→8</sub>	Qtd <sub>7→9</sub>
	<b>6</b>	Qtd <sub>6→1</sub>	Qtd <sub>6→2</sub>	Qtd <sub>6→3</sub>	Qtd <sub>6→4</sub>	Qtd <sub>6→5</sub>	Qtd <sub>6→6</sub>	Qtd <sub>6→7</sub>	Qtd <sub>6→8</sub>	Qtd <sub>6→9</sub>
	<b>5</b>	Qtd <sub>5→1</sub>	Qtd <sub>5→2</sub>	Qtd <sub>5→3</sub>	Qtd <sub>5→4</sub>	Qtd <sub>5→5</sub>	Qtd <sub>5→6</sub>	Qtd <sub>5→7</sub>	Qtd <sub>5→8</sub>	Qtd <sub>5→9</sub>
	<b>4</b>	Qtd <sub>4→1</sub>	Qtd <sub>4→2</sub>	Qtd <sub>4→3</sub>	Qtd <sub>4→4</sub>	Qtd <sub>4→5</sub>	Qtd <sub>4→6</sub>	Qtd <sub>4→7</sub>	Qtd <sub>4→8</sub>	Qtd <sub>4→9</sub>
	<b>3</b>	Qtd <sub>3→1</sub>	Qtd <sub>3→2</sub>	Qtd <sub>3→3</sub>	Qtd <sub>3→4</sub>	Qtd <sub>3→5</sub>	Qtd <sub>3→6</sub>	Qtd <sub>3→7</sub>	Qtd <sub>3→8</sub>	Qtd <sub>3→9</sub>
	<b>2</b>	Qtd <sub>2→1</sub>	Qtd <sub>2→2</sub>	Qtd <sub>2→3</sub>	Qtd <sub>2→4</sub>	Qtd <sub>2→5</sub>	Qtd <sub>2→6</sub>	Qtd <sub>2→7</sub>	Qtd <sub>2→8</sub>	Qtd <sub>2→9</sub>
	<b>1</b>	Qtd <sub>1→1</sub>	Qtd <sub>1→2</sub>	Qtd <sub>1→3</sub>	Qtd <sub>1→4</sub>	Qtd <sub>1→5</sub>	Qtd <sub>1→6</sub>	Qtd <sub>1→7</sub>	Qtd <sub>1→8</sub>	Qtd <sub>1→9</sub>
<b>O-&gt;D</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	
TRL de Destino (TRL <sub>D</sub> )										

Fonte: Próprio autor

É importante destacar que, considerando a diversidade de naturezas dos projetos na amostra (Software, Processo, Produto e Estudo), cada um apresentando perfis de progressão distintos, foram criadas quatro Matrizes de Transição TRL correspondentes às quatro diferentes naturezas

de projeto identificadas. O Quadro 8 traz as definições de cada um desses tipos de projeto que compuseram a análise.

**Quadro 8 - Definições das classificações de Natureza**

Natureza	Definição
Produto	Projetos para a implantação/comercialização de um produto com características de desempenho aprimoradas, de modo a fornecer objetivamente ao consumidor serviços novos ou aprimorados. São inclusos nessa tipologia: Projetos de P&D para materiais, equipamentos e novos produtos.
Processo	Projetos para a implantação de métodos de produção ou comercialização novos ou significativamente aprimorados. São inclusos nessa tipologia: projetos de processos industriais, processos tecnológicos e metodologias.
Software	Projetos de algoritmos ou softwares que envolvem a realização de avanço científico ou tecnológico e/ou solução de incertezas científicas/ tecnológicas em métodos computacionais.
Estudo	Pesquisa cujo objetivo é identificar, mapear e entender as características de uma área geográfica, fenômeno ou tendência tecnológica para realizar uma análise aprimorada em relação aos objetivos econômicos, sociais e ambientais. São inclusos nessa tipologia: análise de dados de uma determinada área (como geociências) e estudos aplicados em uma área (como meio-ambiente).

Fonte: Elaborado pela Organização-objeto com base no Manual de Oslo e adaptado pelo autor

Desta forma, a seção de resultados deste estudo apresentará quatro matrizes distintas, cada uma delas associada a uma natureza específica de projeto, garantindo uma análise dos fluxos de progressão com base em projetos semelhantes. Essa abordagem segmentada visa oferecer uma compreensão mais precisa das dinâmicas de transição de TRL dentro de cada categoria de projeto, permitindo uma análise mais aprofundada e fundamentada dos resultados obtidos.

### 3.5. Métricas utilizadas

Esta seção tem como objetivo apresentar e detalhar o processo de cálculo de algumas métricas intermediárias adotadas por este estudo. Estas métricas desempenham um papel importante, sendo as bases para a obtenção das estimativas de probabilidade de sucesso técnico dos projetos, lacuna principal que o método proposto busca elucidar.

#### 3.5.1 Probabilidade de Transição TRL

Sob a perspectiva matemática, a obtenção desses percentuais foi obtida a partir da Matriz de Transição TRL, a qual, conforme detalhado anteriormente, contém os quantitativos de todas as transições possíveis relacionadas à amostra de trabalho. A representação dessa informação por intermédio da Matriz de Transição revelou o padrão evolutivo dos projetos em análise, permitindo a definição dos fluxos de transição para cada faixa de TRL.

Os fluxos de transição foram inicialmente expressos em termos quantitativos, representando a contagem de pares de transição na Matriz de Transição TRL. No entanto, posteriormente, esses valores quantitativos foram convertidos em percentuais correspondentes, visando proporcionar uma visualização mais precisa das Probabilidades de Transição entre os diferentes níveis de maturidade tecnológica. Essas novas Matrizes de Probabilidade de Transição TRL mantiveram a mesma estrutura das Matrizes de Transição TRL, com a distinção de que cada valor, agora, representa um percentual probabilístico de transição, em vez de um valor absoluto.

A Tabela 4 ilustra o processo de conversão de registros quantitativos para registros probabilísticos em projetos que iniciaram no TRL 3. Este exemplo demonstra como os dados foram transformados, fornecendo uma visão detalhada de como as probabilidades de transição foram calculadas para cada faixa de TRL subsequente.

**Tabela 4 - Exemplo de conversão dos registros quantitativos (Matriz de Transição TRL) para os registros probabilísticos (Matriz de Probabilidade de Transição TRL)**

TRL destino	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Canc	Conc	Total
Quantidade de transições para o TRL destino	1	1	---	25	8	1	1	0	0	7	1	45
Cálculo de conversão	1/45	1/45	---	25/45	8/45	1/45	1/45	0/45	0/45	7/45	1/45	
<b>Probabilidades de Transição</b>	<b>2,2%</b>	<b>2,2%</b>	<b>---</b>	<b>55,6%</b>	<b>17,8%</b>	<b>2,2%</b>	<b>2,2%</b>	<b>0,0%</b>	<b>0,0%</b>	<b>15,6%</b>	<b>2,2%</b>	<b>100,0%</b>
<b>Probabilidade de Progressão</b>	<b>55,6%+17,8%+2,2%+2,2%+0,0%+0,0% = 77,8%</b>											

Fonte: Próprio autor

Conforme demonstrado na Tabela 4, foi registrado um total de 45 transições do TRL 3 para outros níveis, representando este valor a soma de cada uma das transições identificadas acrescida dos cancelamentos e conclusões observados. Entre essas 45 transições, foram observadas duas regressões sendo uma para o TRL 1 e outra para o TRL 2. Além disso, foram identificados oito casos em que os projetos foram descontinuados no próprio TRL 3 (sete cancelamentos e 1 conclusão), enquanto vinte e cinco avançaram para o TRL 4 e assim sucessivamente para os demais níveis de TRL.

A conversão desses quantitativos em suas respectivas probabilidades foi realizada de forma simples, consistindo na obtenção da fração entre a quantidade de transições para o TRL em questão e o total de transições e descontinuidades (cancelamentos e conclusões) observados,

conforme pode ser visto na linha da tabela denominada “Cálculo de conversão”. A notação matemática desta métrica, portanto, foi expressa da seguinte forma:

$$P(\text{Transição } TRL_{A \rightarrow B}) = \frac{\text{Quantidade Transições}_{(TRL_{A \rightarrow B})}}{\sum \text{Transições}_{(TRL_A)} + \text{Descontinuidades}_A}$$

A leitura final da Tabela 4, portanto, indica que, neste exemplo, a maioria das transições que partiram do TRL 3 se destinaram ao TRL 4, de modo que esse par de transição TRL<sub>3→4</sub> apresentou um percentual de incidência da ordem de 55,6%. Além dessa possibilidade de progressão, foram observados também casos em que os Projetos evoluíram diretamente do TRL 3 para os TRL 5 (17,8%), TRL 6 (2,2%) e até TRL 7 (2,2%).

### 3.5.2 Probabilidade de Progressão TRL

A métrica da Probabilidade de Progressão consistiu num desdobramento da Probabilidade de Transição, sendo composta pelo somatório das Probabilidades de Transição que denotaram o avanço no nível de maturidade do projeto. Nesse sentido, no que diz respeito à Tabela 4, pode-se dizer que a Probabilidade de Progressão do TRL 3 para algum TRL superior correspondeu a 77,8%, sendo este valor obtido mediante a soma das probabilidades de transição TRL<sub>3→4</sub> (55,6%) + TRL<sub>3→5</sub> (17,8%) + TRL<sub>3→6</sub> (2,2%) + TRL<sub>3→7</sub> (2,2%) + TRL<sub>3→8</sub> (0,0%) + TRL<sub>3→9</sub> (0,0%). De maneira geral, é possível afirmar que a Probabilidade de Progressão, isto é, de aumento no nível de maturidade do projeto além do estágio atual, pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$P(\text{Progressão } TRL_N) = \sum_{\substack{B=N+1 \text{ (variável)} \\ A=N \text{ (constante)}}}^9 P(\text{Transição } TRL_{A \rightarrow B})$$

A variável “A” corresponde ao nível de TRL em análise e pode variar de 2 a 9, uma vez que o nível 9 representa o patamar máximo de maturidade, não sendo possível ultrapassá-lo. Nesse sentido, cada Matriz TRL foi capaz de gerar oito Probabilidades de Progressão, que, quando alinhadas, constituem um componente denominado neste estudo como “Vetor de Progressão”.

### 3.5.3 Vetor de Progressão TRL

Ao contrário das métricas anteriores, o Vetor de Progressão não requereu qualquer memória de cálculo, pois foi gerado pela concatenação vetorial das oito probabilidades de progressão associadas às Matrizes de Transição desenvolvidas. Assim, o Vetor pôde ser

expresso como uma sequência de elementos que representam as probabilidades de progressão para cada faixa de maturidade tecnológica.

**Tabela 5 - Vetor de Progressão TRL - Genérico**

$$VProg = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline P(Progr_2) & P(Progr_3) & P(Progr_4) & P(Progr_5) & P(Progr_6) & P(Progr_7) & P(Progr_8) & P(Progr_9) \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Próprio autor

Do ponto de vista semântico, o vetor de progressão representou as probabilidades de um determinado projeto avançar na escala TRL. Este novo elemento constituiu a principal referência para a construção das Probabilidades de Sucesso Técnico dos projetos, variável essa que contemplou o principal objetivo do método de análise proposto por este trabalho.

### 3.5.4 Probabilidade Histórica de Sucesso Técnico

A lacuna de pesquisa identificada na seção introdutória deste documento diz respeito à carência de referenciais estatísticos que possam conferir maior solidez e embasamento à métrica da "Probabilidade de Sucesso Técnico" aplicada na gestão de portfólios de projetos. Considerando que o êxito técnico de um projeto de tecnologia pode ser correlacionado à perspectiva da probabilidade de alcançar o nível de maturidade tecnológica desejado pela equipe de projeto, a Probabilidade Histórica de Sucesso Técnico pode ser obtida mediante uma combinação das probabilidades de progressão nível a nível.

Matematicamente, neste trabalho, essa associação foi materializada pela multiplicação sequencial das Probabilidades de Progressão dos níveis a serem percorridos até se chegar ao nível desejado. Dessa maneira, quanto maior for o intervalo de níveis de maturidade que se deseja percorrer, por se tratar de percentuais, menor será a probabilidade esperada. Neste sentido, a título de exemplo, se um dado Vetor de Progressão hipotético tivesse a seguinte configuração:

**Tabela 6 - Vetor de Progressão TRL - Hipotético**

$$VProg = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline P(Progr_2) & P(Progr_3) & P(Progr_4) & P(Progr_5) & P(Progr_6) & P(Progr_7) & P(Progr_8) & P(Progr_9) \\ \hline 80,0\% & 77,5\% & 75,0\% & 72,5\% & 70,0\% & 67,5\% & 65,0\% & 62,5\% \\ \hline \end{array}$$

Fonte: Próprio autor

A probabilidade de sucesso técnico deste projeto elevar seu TRL do nível 2 para o nível 5, seria calculada como 42,1%. Essa probabilidade resulta da multiplicação das probabilidades de progressão em cada estágio do TRL: 77,5% × 75,0% × 72,5% (destaque em azul). Por outro lado, se o objetivo fosse elevar esse mesmo TRL inicial do nível 2 para o nível 8, a probabilidade

de sucesso técnico seria reduzida para 12,9%. Essa redução ocorre em razão da multiplicação de mais etapas a serem vencidas no processo de progressão do TRL:  $77,5\% \times 75,0\% \times 72,5\% \times 70,0\% \times 67,5\% \times 65,0\%$  (destaque em vermelho).

A aplicação desse processo de multiplicação para as distintas trajetórias de maturação do TRL representou a fase final do processamento dos dados, resultando na obtenção das Probabilidades Históricas de Sucesso Técnico, alvo deste estudo.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Conforme descrito na seção "Método" deste estudo, os 873 projetos que compõem a amostra foram categorizados e quantificados com base em suas Naturezas e Status, visando à análise dos padrões de progressão dentro de grupos de projetos semelhantes. Essa abordagem permitiu uma análise mais detalhada das características e tendências de evolução dos projetos, considerando suas especificidades e objetivos individuais. Os diferentes tipos de natureza assumiram as seguintes classificações: (1) Software, (2) Processo, (3) Produto ou (4) Estudo. Já no que tange aos possíveis Status dos projetos, esses foram tipificados como: (1) Em Execução, (2) Cancelado ou (3) Concluído.

Uma primeira questão a ser abordada previamente à análise descritiva da base de trabalho diz respeito à dinâmica dos status dos projetos ao longo do tempo. Durante o processo de quantificação das diferentes naturezas de projeto em suas respectivas qualificações, observou-se que aproximadamente 6% da amostra (53 projetos), passaram por alterações de natureza ao longo de sua trajetória. Diante dessa situação, decidiu-se por qualificar esses projetos de acordo com a última classificação registrada, levando em consideração que esta reflete a natureza do projeto em seu estágio mais avançado de desenvolvimento.

Outro fator de considerável importância, digno de menção, consiste no tamanho da amostra de projetos utilizada neste estudo, totalizando 873 projetos. Esse quantitativo é substancialmente maior em comparação com a base de dados examinada por Ma (2021), que empregou apenas 172 projetos após a aplicação de filtros na base de dados original. A perda de registros durante esse processo foi destacada por este autor em sua conclusão e por Alexander (2018) que também enfrentou esse mesmo obstáculo. Desse modo, a oportunidade de trabalhar com uma base final de 873 projetos representa uma das principais vantagens distintivas deste estudo em relação a pesquisas anteriores. Essa amplitude na amostra proporciona uma base mais sólida para as

análises estatísticas de fluxo transitório que foram conduzidas e conclusões mais abrangentes sobre os padrões e tendências observados no contexto do desenvolvimento tecnológico.

#### 4.1. Análise da Distribuição dos projetos por Status e Natureza

**Tabela 7 - Distribuição quantitativa da base de trabalho por Status e Natureza de Projeto**

Status	Natureza				Total Geral	% Status
	Software	Processo	Produto	Estudo		
Em Execução	175	193	158	69	595	68,2%
Cancelado	58	47	72	15	192	22,0%
Concluído	35	28	11	12	86	9,9%
<b>Total Geral</b>	<b>268</b>	<b>268</b>	<b>241</b>	<b>96</b>	<b>873</b>	<b>100,0%</b>
<b>% Natureza</b>	<b>30,7%</b>	<b>30,7%</b>	<b>27,6%</b>	<b>11,0%</b>	<b>100,0%</b>	

**Tabela 8 - Distribuição percentual da base de trabalho por Status e Natureza de Projeto**

Status	Natureza			
	Software	Processo	Produto	Estudo
Em Execução	65,3%	72,0%	65,6%	71,9%
Cancelado	21,6%	17,5%	29,9%	15,6%
Concluído	13,1%	10,4%	4,6%	12,5%
<b>Total Geral</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

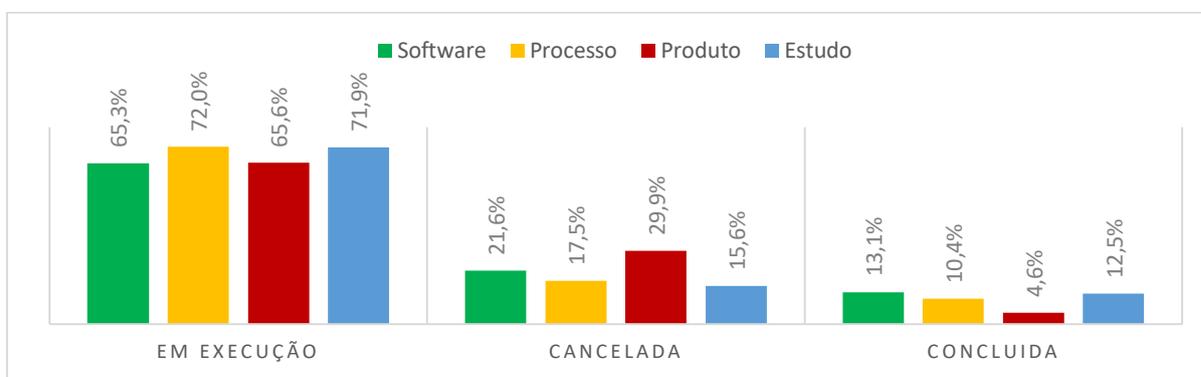
No que tange à distribuição da natureza dos projetos da amostra verifica-se por meio da análise da Tabela 7 uma distribuição razoavelmente equilibrada dos quatro diferentes tipos de projeto, sendo os projetos do tipo “Estudo” os que apresentaram menor ocorrência. Ainda assim, mesmo sendo a classificação com o menor número de registros, o quantitativo associado a essa natureza mostrou-se expressivo, contando com 91 casos. Projetos do tipo “Software”, “Processo” e “Produto” apresentaram uma distribuição relativamente semelhante em termos percentuais com quantitativos de 268, 268 e 241, casos respectivamente.

Em relação às classificações de status dos projetos, observa-se que a maioria destes se encontra em fase de execução, representando 68,2% do total. Isso sugere que a maioria dos projetos está ativamente em andamento, o que pode indicar um alto nível de atividade e investimento em desenvolvimento de tecnologia. O número de projetos cancelados representa 22,0% do total, indicando que uma parcela significativa dos projetos não foi concluída conforme planejado. Isso pode ser resultado de desafios técnicos, financeiros ou de potencial de gestão enfrentados

durante a execução dos projetos. Em face do alto índice de projetos cancelados, observa-se uma porcentagem de projetos concluídos relativamente baixa no período considerado (23 meses), representando apenas 9,8% do total.

No entanto, sendo a amostra composta por diferentes perfis de projeto, faz-se necessária uma avaliação que conjugue as variáveis “Status” e “Natureza” com o propósito de aprofundar a análise, identificando eventuais padrões de comportamento para cada tipo de projeto. Nesse sentido, o Gráfico 4 compreende uma releitura da Tabela 8 de maneira a tornar visualmente mais claras as distribuições observadas.

**Gráfico 4 - Distribuição percentual da base de trabalho por Status e Natureza de Projeto**



No que diz respeito aos projetos com status “Em Execução” foi observado que os quatro diferentes tipos de natureza apresentaram percentuais de alocação próximos à média geral de 68,2%, sem desvios significativos. Nesse contexto, superaram a média projetos do tipo “Processo” e “Estudo” com percentuais na faixa dos 72% e os do tipo “Software” e “Produto” ficaram abaixo desse valor apresentando percentuais na faixa dos 65%. Ainda assim, a segmentação por natureza, para este status, não representou um diferencial no processo de análise

Já em relação aos projetos "cancelados", uma análise mais detalhada revelou dinâmicas distintas entre as diferentes naturezas de projetos. Os resultados indicaram que os projetos classificados como "Estudo" apresentaram as menores taxas de cancelamento, com apenas 15,6% de ocorrências. Em seguida, os projetos classificados como "Processo" registraram uma taxa de cancelamento ligeiramente maior, atingindo 17,5%. Em terceiro lugar, os projetos de natureza "Software" demonstraram uma taxa geral de cancelamento de 21,6%, enquanto os projetos do tipo "Produto" apresentaram a maior taxa de cancelamento, aproximadamente 30%.

A análise dos projetos com status “Concluído” acabou por complementar o que pôde ser observado mediante a análise conjunta dos projetos “em execução” e “cancelados”. Nesse sentido, projetos de natureza “Software” apresentaram os melhores índices de conclusão (13,1%) seguidos pelos projetos do tipo “Estudo” (12,5%). Em terceiro lugar ficaram os projetos de natureza “Processo” com 10,4% e, por último, conforme esperado, os projetos de desenvolvimento de “Produtos” revelaram o pior índice de conclusão na faixa dos 4,6%.

Essa disposição dos dados revelou um achado significativo desta pesquisa, que consiste na compreensão das tendências de cancelamento e conclusão de projetos, sugerindo possíveis padrões de desempenho relacionados à natureza específica de cada tipo de projeto. Tal constatação representa conhecimento valioso para o aprimoramento da gestão de portfólio de projetos de tecnologia, destacando a necessidade de estratégias diferenciadas para mitigar os riscos associados a cada categoria de projeto e, conseqüentemente, promoção de maior eficácia no alcance dos objetivos organizacionais. Nesse sentido, esse primeiro achado poderia ser sintetizado da seguinte forma:

A classificação da Natureza dos projetos em desenvolvimento exerce sensibilidade sobre seus índices de sucesso. Isso ressalta a importância de identificar o comportamento e os riscos específicos associados ao progresso de cada tipo de projeto e elaborar planos de ação direcionados para gerenciá-los de forma eficaz.

#### 4.2. Análise dos TRLs iniciais e finais dos projetos

**Tabela 9 - TRLs iniciais por Natureza de Projeto**

TRL	Software		Processo		Produto		Estudo		Total Qtd.
	Qtd	%	Qtd	%	Qtd	%	Qtd	%	
1	17	6,3%	10	3,7%	10	4,1%	3	3,1%	40
2	25	9,3%	24	9,0%	27	11,2%	28	29,2%	104
3	55	20,5%	44	16,4%	43	17,8%	13	13,5%	155
4	54	20,1%	85	31,7%	54	22,4%	27	28,1%	220
5	41	15,3%	36	13,4%	46	19,1%	5	5,2%	128
6	43	16,0%	32	11,9%	21	8,7%	5	5,2%	101
7	23	8,6%	15	5,6%	19	7,9%	7	7,3%	64
8	8	3,0%	13	4,9%	15	6,2%	2	2,1%	38
9	2	0,7%	9	3,4%	6	2,5%	6	6,3%	23
<b>Total</b>	<b>268</b>	<b>100,0%</b>	<b>268</b>	<b>100,0%</b>	<b>241</b>	<b>100,0%</b>	<b>96</b>	<b>100,0%</b>	<b>873</b>

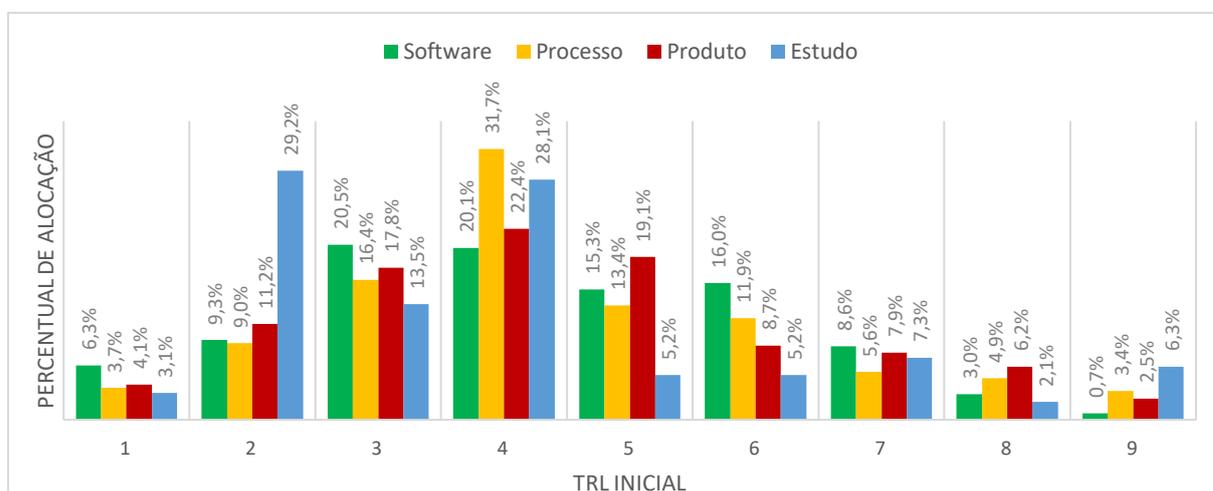
**Tabela 10 - TRLs finais dos projetos encerrados com Status “Concluído” por Natureza de Projeto**

TRL final	Natureza				Total
	Software	Processo	Estudo	Produto	
9	19	15	11	11	56
8	5	5	1		11
7	8	7			15
6	1	1			2
5	1				1
3	1				1
<b>Total Geral</b>	<b>35</b>	<b>28</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>86</b>

Antes de adentrar na discussão relativa aos fluxos de TRL apurados após o processamento dos dados, conforme delineado nas etapas metodológicas descritas na seção correspondente, foi feita uma análise prévia sobre a base de dados ainda não processada. Essa análise disse respeito à quantificação dos TRLs iniciais e finais dos projetos em estudo.

Para esse fim, foram elaboradas duas tabelas distintas: a Tabela 9, que quantifica os TRLs iniciais dos 873 projetos que compõem a amostra de pesquisa, e a Tabela 10, que quantifica os TRLs finais dos 86 projetos que alcançaram o status de conclusão. O objetivo primordial dessa análise estatística foi o de identificar possíveis padrões característicos relacionados ao grau de maturidade no início e no término dos projetos, especialmente considerando que, de acordo com as definições propostas por Mankins (1995), não existe determinismo quanto ao nível inicial ou final de maturidade de um projeto. O Gráfico 5 representa visualmente os dados apresentados na Tabela 9, facilitando a compreensão das alocações percentuais por nível de maturidade tecnológica.

**Gráfico 5 - Alocação percentual dos TRLs iniciais por Natureza de projeto**



A análise dos percentuais no Gráfico 5 - TRLs Iniciais - revelou que a maioria dos projetos classificados como "Software" ingressou na base de dados de forma relativamente equilibrada entre os TRLs 3, 4, 5 e 6, com percentuais de 20,5%, 20,1%, 15,3% e 16,9%, respectivamente. De acordo com a interpretação proposta por Pierro (2019) sobre as definições de Mankins (1995), isso sugere que uma pequena parte desses projetos começa em estágios conceituais, enquanto a maioria já está em estágios mais avançados de maturidade, abrangendo etapas relacionadas à prototipagem e até mesmo validação dos empreendimentos propostos. Essa descoberta parece coerente, considerando a natureza dos projetos de software e sua relativa "facilidade" de desenvolvimento e implantação em comparação com projetos relacionados à infraestrutura ou hardware.

Em contrapartida aos projetos de software, a análise dos projetos do tipo "Processo" revelou uma dinâmica distinta. Esta categoria de projeto demonstrou uma notável concentração em um único TRL inicial, com 31,7% dos projetos iniciando no TRL 4. Seguidamente a esse percentual, verificou-se também presença de TRLs iniciais nos níveis 3 e 5 com percentuais de 16,4% e 13,4% respectivamente. Esses resultados sugerem que a maioria dos projetos de desenvolvimento de processos começa nos estágios de prototipagem, preponderantemente mediante testes em escala reduzida (PIERRO, 2019), porém ainda havendo uma pequena parcela nas fases finais de conceituação.

Projetos do tipo "Produto", assim como os anteriores, demonstraram maior presença de TRL inicial nos níveis 3, 4 e 5, porém de maneira mais equilibrada que aqueles, com cerca de 17,8%, 22,4% e 19,1% respectivamente. Essa composição sugere que esses projetos iniciam seu desenvolvimento em estágios de maturidade ligeiramente mais avançados do que os projetos do tipo "Processo", com uma representatividade maior nas fases de prototipagem. Essa observação ressalta a capacidade dessa natureza de projeto em iniciar seu desenvolvimento além das etapas iniciais de conceituação, indicando uma predisposição para uma implementação mais prática e tangível desde o início do processo de desenvolvimento.

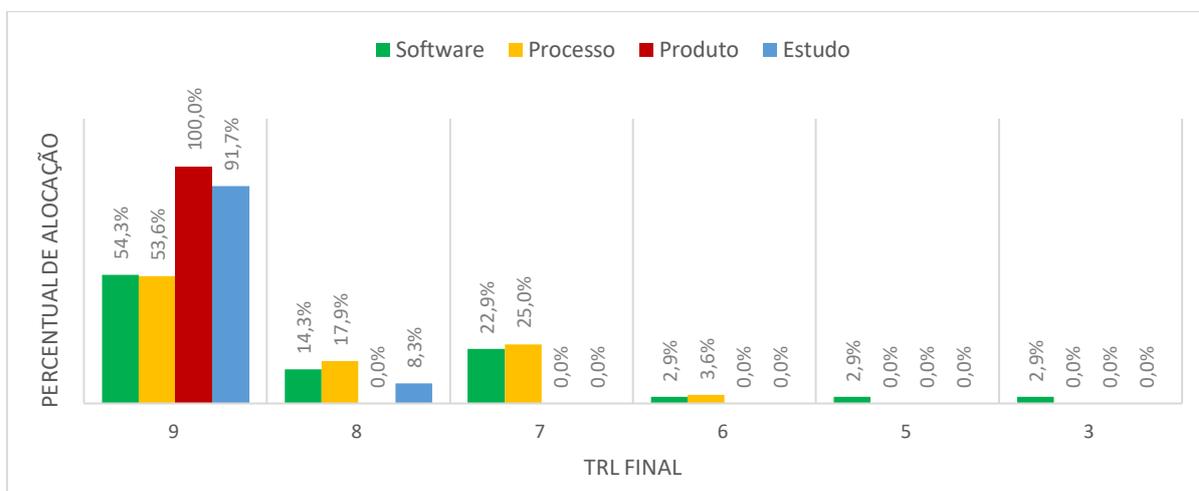
No caso dos projetos do tipo "Estudo", a análise dos dados revelou que os TRLs de nível 2, 3 e 4 concentraram o maior número de projetos, cerca de 70,8%, sendo esta categoria de projeto a que apresentou maior concentração de TRL inicial na fase de conceituação. Isso sugeriu que a maioria desses projetos iniciou sua jornada de desenvolvimento tecnológico em estágios conceituais, com uma parcela adicional já avançando para a fase de prototipagem. Tal distribuição ressalta a natureza experimental e investigativa desses projetos, que buscam estabelecer fundamentos e conceitos antes de avançar para estágios mais avançados de

implementação. Ainda assim, tal concentração pode estar associada a questões relativas ao processo de parametrização das definições propostas por Mankins (1995). Tendo em vista que as definições de maturidade tecnológica propostas por este autor foram concebidas sob a perspectiva de projetos de inovação focados em *hardware*, torna-se complexa a parametrização de tais definições para a categoria de projetos de estudo.

Uma descoberta relevante nesses dados foi a presença de registros de TRL iniciais abrangendo todos os nove níveis de maturidade tecnológica possíveis. Isso sugere que uma parte dos projetos já havia alcançado avanços tecnológicos antes mesmo de serem monitorados pela organização através da Escala TRL. Essa constatação é particularmente notável, já que os TRLs de nível 9 representam o grau máximo de maturidade tecnológica dentro dessa escala. Isso levanta a questão de que os primeiros registros da base podem não refletir necessariamente o estágio inicial real de desenvolvimento dos projetos. Isso se deve ao fato de que o início da gestão do portfólio de projetos de P&D com base em TRL se deu com um conjunto de projetos em execução – houve um resgate de registros que alimentou o sistema em seu início. Além disso, a análise dos dados revelou que alguns projetos, desde seu primeiro registro, já apresentavam o status de "Cancelado" ou "Concluído", novamente evidenciando o fato de que na base já estavam presentes projetos em estágios avançados de desenvolvimento tecnológico ou mesmo descontinuados.

Dando continuidade à proposta desse segmento do trabalho, o Gráfico 6 aborda a alocação percentual dos TRLs finais dos projetos da amostra classificados com o status “Concluído” em seu último registro.

**Gráfico 6 - Alocação percentual dos TRLs finais por Natureza de projeto**



A análise do Gráfico 6 permitiu estabelecer alguns apontamentos importantes acerca das características dos TRLs finais nos projetos da amostra. De acordo com os dados, a maioria dos TRLs finais se concentrou nos níveis 7, 8 e 9, sendo a maior proporção desses no TRL 9. Conforme destacado por Pierro (2019), esses estágios de maturidade correspondem a momentos específicos no desenvolvimento de projetos de tecnologia, como a demonstração do protótipo em ambiente operacional (TRL 7), a validação da tecnologia em ambiente operacional (TRL 8) e a prontidão do produto para o mercado (TRL 9). Isso indica que, no caso dos projetos do tipo "Produto", a organização-objeto teve como meta levar todos os produtos de seu portfólio até a fase de comercialização. Os projetos do tipo "Estudo" exibiram um padrão de conclusão semelhante aos projetos do tipo "Produto", embora um projeto dessa natureza tenha sido classificado como concluído no TRL 8. Em contraste, os projetos do tipo "Software" e "Processo" mostraram mais variação nos TRLs de conclusão, apresentando um número menor, porém significativo de casos nos TRLs 7 e 8. O gráfico também revelou projetos com conclusão nos TRLs 6, 5 e 3, porém a baixa quantidade desses casos sugere possíveis erros de registro na base de controle.

### 4.3. Análise das Matrizes de Transição TRL por Natureza de Projeto

**Tabela 11 - Matriz de Transição TRL - Software**

Natureza: Software (268 projetos na amostra)

		Transições								Descontinuidades		Métricas derivadas					
		Matriz de Transição								Cancelados (A)	Concluídos (B)	Regressões (C)	Progressões (D)	Total de transições (E)=A+B+C+D	Vetor de Progressão (F) = (D)/(E)		
A = TRL de origem	9									2 (9,5%)	19 (90,5%)	(0,0%)		21	0,0%		
	8							2	15	2 (8,3%)	5 (20,8%)	2 (8,3%)	15	24	62,5%		
	7	1		1	1	6			23	10	8 (13,8%)	8 (13,8%)	9 (15,5%)	33	58	56,9%	
	6			4	1				55	4	2	11 (14,1%)	1 (1,3%)	5 (6,4%)	61	78	78,2%
	5	1	1	4					43	5	1	9 (13,8%)	1 (1,5%)	6 (9,2%)	49	65	75,4%
	4	1				33	17	2				8 (13,1%)	(0,0%)	1 (1,6%)	52	61	85,2%
	3	1	1			25	8	1	1			7 (15,6%)	1 (2,2%)	2 (4,4%)	35	45	77,8%
	2				8	4	3					7 (31,8%)	(0,0%)	(0,0%)	15	22	68,2%
	1			4	2		1	1				4 (33,3%)	(0,0%)	(0,0%)	8	12	66,7%
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>58</b>	<b>35</b>	<b>25</b>	<b>268</b>	<b>386</b>			
	B = TRL de destino																

**Tabela 12 - Matriz de Transição TRL – Processo**

Natureza: Processo (268 projetos na amostra)

		Transições								Descontinuidades		Métricas derivadas					
		Matriz de Transição								Cancelados (A)	Concluídos (B)	Regressões (C)	Progressões (D)	Total de transições (E)=A+B+C+D	Vetor de Progressão (F) = (D)/(E)		
A = TRL de origem	9									1 (6,3%)	15 (93,8%)	(0,0%)		16	0,0%		
	8	1				3	5		8	(0,0%)	5 (22,7%)	9 (40,9%)	8	22	36,4%		
	7				3	4		14	1	2 (6,5%)	7 (22,6%)	7 (22,6%)	15	31	48,4%		
	6			1	5			32	5	1	6 (11,8%)	1 (2,0%)	6 (11,8%)	38	51	74,5%	
	5				8			32	2	1	2	10 (18,2%)	(0,0%)	8 (14,5%)	37	55	67,3%
	4	3	6			44	8	2	2		13 (16,7%)	(0,0%)	9 (11,5%)	56	78	71,8%	
	3				26	5	3	1			8 (18,6%)	(0,0%)	(0,0%)	35	43	81,4%	
	2				13	3	3	1			4 (16,7%)	(0,0%)	(0,0%)	20	24	83,3%	
	1				3	2	1				3 (33,3%)	(0,0%)	(0,0%)	6	9	66,7%	
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>47</b>	<b>28</b>	<b>39</b>	<b>215</b>	<b>329</b>			
	B = TRL de destino																

**Tabela 13 - Matriz de Transição TRL - Produto**

Natureza: Produto (241 projetos na amostra)

		Transições								Descontinuidades		Métricas derivadas					
		Matriz de Transição								Cancelados (A)	Concluídos (B)	Regressões (C)	Progressões (D)	Total de transições (E)=A+B+C+D	Vetor de Progressão (F) = (D)/(E)		
A = TRL de origem	9							1		(0,0%)	11 (91,7%)	1 (8,3%)		12	0,0%		
	8					1	5		6	1 (7,7%)	(0,0%)	6 (46,2%)	6	13	46,2%		
	7				2	1	7		13	1	7 (22,6%)	(0,0%)	10 (32,3%)	14	31	45,2%	
	6	1			3	1			26	3	6 (15,0%)	(0,0%)	5 (12,5%)	29	40	72,5%	
	5	1		2	9				31	4	1	13 (21,3%)	(0,0%)	12 (19,7%)	36	61	59,0%
	4		4	8			34	7	1	1	12 (17,9%)	(0,0%)	12 (17,9%)	43	67	64,2%	
	3		2			19	4	3			20 (41,7%)	(0,0%)	2 (4,2%)	26	48	54,2%	
	2				12	4		1			9 (34,6%)	(0,0%)	(0,0%)	17	26	65,4%	
	1				5	1	1				4 (36,4%)	(0,0%)	(0,0%)	7	11	63,6%	
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>72</b>	<b>11</b>	<b>48</b>	<b>178</b>	<b>309</b>			
	B = TRL de destino																

**Tabela 14 - Matriz de Transição TRL - Estudo**

Natureza: Estudo (96 projetos na amostra)

		Transições							Descontinuidades		Métricas derivadas						
		Matriz de Transição							Cancelados (A)	Concluídos (B)	Regressões (C)	Progressões (D)	Total de transições (E)=A+B+C+D	Vetor de Progressão (F) = (D)/(E)			
A = TRL de origem	9	1				1	1		(0,0%)	11 (78,6%)	3 (21,4%)		14	0,0%			
	8						1	6	1 (11,1%)	1 (11,1%)	1 (11,1%)	6	9	66,7%			
	7				3	1		9	5	(0,0%)	(0,0%)	4 (22,2%)	14	18	77,8%		
	6			1				11	1	1	(0,0%)	(0,0%)	1 (7,1%)	13	14	92,9%	
	5			1	1			6	1	1	3 (23,1%)	(0,0%)	2 (15,4%)	8	13	61,5%	
	4		2	1			12	6	1		4 (15,4%)	(0,0%)	3 (11,5%)	19	26	73,1%	
	3		1			12	1		1	1	3 (15,8%)	(0,0%)	1 (5,3%)	15	19	78,9%	
	2	1			13	3	1	1		1	3 (13,0%)	(0,0%)	1 (4,3%)	19	23	82,6%	
	1			1							1 (50,0%)	(0,0%)	(0,0%)	1	2	50,0%	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	15	12	16	95	138		
		B = TRL de destino															

As Tabelas 11, 12, 13 e 14 apresentadas na seção de Resultados deste trabalho materializam: as Matrizes de Transição TRL encontradas para as diferentes naturezas de projeto, os quantitativos de conclusões e cancelamentos, bem como os Vetores de Progressão e outras métricas derivadas. A forma de composição desses elementos é apresentada nos parágrafos seguintes desta seção, uma vez que se tratou de uma estrutura comum de organização dos dados aplicada no processo de análise de todas as naturezas investigadas.

#### 4.3.1. Racional das métricas de fluxo transitório

As Matrizes de Transição TRL representam o primeiro componente dessas tabelas de resultado e foram elaboradas a partir dos números de pares de transições identificados para cada Grupo de projeto. Essas matrizes seguem uma estrutura organizada, onde as linhas indicam as origens e as colunas representam os destinos de uma determinada transição.

No entanto, projetos que, por motivo de cancelamento ou conclusão, não avançaram além de um determinado nível não puderam ser adequadamente retratados por meio desse instrumento. Para contornar essa limitação da Matriz, foram criadas as colunas “Cancelados (A)” e “Concluídos (B)” que constituem o segundo componente da tabela com o propósito de contabilizar o quantitativo de projetos descontinuados a cada nível. Tais métricas, portanto, complementaram as informações fornecidas pela Matriz de Transição TRL, uma vez que sua estrutura não permitiu representar de maneira explícita os casos em que os projetos foram interrompidos, seja em função de sua conclusão ou até de seu cancelamento. É importante

salientar que as transições contabilizadas como concluídas ou canceladas remetem apenas às últimas movimentações dos projetos em análise. Em outras palavras, todo o histórico de transição do projeto, até sua descontinuidade, foi contemplado na Matriz, gerando maior aproveitamento dos dados da amostra.

O terceiro e último componente das Tabelas de resultado foi representado por uma seção de estatísticas intitulada "Métricas derivadas", destinada a incluir indicadores pertinentes relacionados aos fluxos de transição. Nessa seção, foram apresentadas várias métricas relevantes para a análise dos dados. A primeira delas, denominada "Regressões (C)", quantificou a quantidade e a porcentagem de retrocessos identificados em cada faixa de TRL. A segunda métrica, chamada de "Progressões (D)", teve o objetivo de quantificar o número de avanços observados, destacados em azul na tabela. A terceira métrica abordou o "Total de transições (E)" por faixa de TRL, englobando cancelamentos, conclusões, regressões e progressões. Por fim, a última e mais significativa métrica dessa seção foi o "Vetor de Progressão (F)", calculado pela razão entre o número de progressões e o total de transições observadas.

#### **4.3.2. Dinâmicas notáveis observadas nos fluxos transitórios**

Na subseção anterior, foram estabelecidas as métricas utilizadas nas tabelas de fluxo transitório. Nesta continuação do estudo, a presente subseção teve por objetivo sustentar o processo investigativo proposto, dedicando-se a enumerar os comportamentos notáveis relacionados às dinâmicas evolutivas de maturidade dos projetos observadas durante a análise dos fluxos transitórios apurados. Este esforço, portanto, visou preencher mais uma das lacunas na literatura identificadas no início deste documento, sendo esta relacionada à predominância de abordagens acadêmicas sobre o tema que tratam da maturidade tecnológica apenas sob uma perspectiva classificatória estática.

##### **1. Comportamento das progressões de maturidade tecnológica**

Considerando a natureza gradual do processo evolutivo tecnológico delineado pela Escala TRL de Mankins (1995), no qual cada etapa do desenvolvimento implica pequenos avanços progressivos e complementares, poder-se-ia presumir, de forma empírica, que o amadurecimento dos projetos seguiria uma trajetória linear, avançando nível a nível. Essa suposição foi corroborada por Héder (2017), que, em um exercício simplificado de projeção com o objetivo de estimar o fluxo de projetos em um portfólio, partindo do TRL 1 e avançando até o TRL 9, adotou essa mesma perspectiva linear de progressão.

No entanto, ao examinar as Matrizes de Transição (Tabelas 11, 12, 13 e 14), inicialmente, essa expectativa não foi integralmente corroborada, pois foram identificadas algumas evoluções não lineares de TRL. Diante dessa possível contradição, uma análise quantitativa mais detalhada desses fluxos de progressão foi realizada. A Tabela 15, construída a partir das Tabelas 11, 12, 13 e 14 apresenta uma síntese da distribuição das progressões observadas em termos da variação absoluta de TRL ( $\Delta_{TRL}$ ) por Natureza de projeto.

**Tabela 15 -Dinâmica de progressão da maturidade tecnológica por Natureza**

**Software**

$\Delta_{TRL}$	Avanço de TRLs por progressão								Total
	Linear	Não linear							
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Qtd	206	50	9	2	1	0	0	0	268
Freq	76,9%	18,7%	3,4%	0,7%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	

**Produto**

$\Delta_{TRL}$	Avanço de TRLs por progressão								Total
	Linear	Não linear							
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Qtd	146	24	6	1	1	0	0	0	178
Freq	82,0%	13,5%	3,4%	0,6%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	

**Processo**

$\Delta_{TRL}$	Avanço de TRLs por progressão								Total
	Linear	Não linear							
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Qtd	172	26	11	5	1	0	0	0	215
Freq	80,0%	12,1%	5,1%	2,3%	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%	

**Estudo**

$\Delta_{TRL}$	Avanço de TRLs por progressão								Total
	Linear	Não linear							
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Qtd	69	18	3	3	0	1	1	0	95
Freq	72,6%	18,9%	3,2%	3,2%	0,0%	1,1%	1,1%	0,0%	

De acordo com os dados da referida tabela, os projetos da Natureza “Software” apresentaram 268 transições de progressão no total, das quais 206 (76,9%) avançaram para o TRL imediatamente posterior, ou seja, apresentaram evolução linear. Em contrapartida, as 62 transições restantes (23,1%) avançaram dois ou mais níveis em apenas um movimento de transição, caracterizando as mencionadas evoluções não lineares. Já os projetos do tipo “Processo”, apresentaram maior aderência à dinâmica linear de progressão com 80,0% de suas 215 transições obedecendo a esse comportamento evolutivo. Projetos de Natureza “Produto” apresentaram um índice ainda maior de progressões lineares com uma taxa de 82,0% e os do tipo “Estudo” foram os de menor aderência com 72,6%.

Essa descoberta, portanto, contrariou a concepção de uma progressão inteiramente gradual na maturidade tecnológica dos projetos, indicando a existência de padrões de desenvolvimento mais complexos e não necessariamente sequenciais.

Embora as diversas Naturezas de projeto tenham exibido diferenças nos percentuais de  $\Delta_{TRL} = 1$ , de maneira geral, essas disparidades não foram tão pronunciadas entre si. Isso sugere que, apesar de alguns casos apresentarem saltos de progressão, a maioria dos projetos tende a seguir

uma trajetória evolutiva linear, indo de TRL X para TRL X+1. Esse achado estatístico sustenta, em grande medida, a simplificação proposta por Héder (2017) e, de maneira ainda mais significativa, uma das proposições metodológicas deste trabalho, a qual pressupõe avanços lineares e contínuos na construção dos Vetores de Progressão.

Ainda assim, ao examinar os casos extremos de  $\Delta_{TRL} = 1$ , especialmente em relação aos projetos do tipo “Produto” e “Estudo”, foi observada uma diferença de aproximadamente 9,4% entre eles. Essa disparidade ressaltou diferenças estruturais entre esses dois tipos de projeto, sugerindo que o primeiro parece depender de um processo de progressão mais gradual, possivelmente exigindo a passagem por todos os níveis de maturidade tecnológica. Por outro lado, os projetos de natureza “Estudo” demonstraram um pouco mais de flexibilidade em termos de evoluções não lineares, provavelmente em razão do seu caráter mais exploratório e menos sujeito a restrições estruturais ou de processo.

É relevante destacar que, de acordo com Mankins (2004), à medida que os projetos avançam na escala TRL, tanto a complexidade quanto o custo do progresso na maturidade tecnológica aumentam significativamente. Portanto, seria natural esperar que os avanços de um nível para o próximo ocorressem com maior frequência do que os saltos para níveis mais distantes. Nesse contexto, os resultados obtidos se mostraram alinhados com essa expectativa, uma vez que os saltos de  $\Delta_{TRL} > 1$  foram consideravelmente menos frequentes em comparação com as progressões de  $\Delta_{TRL} = 1$ , como evidenciado na Tabela 15.

## 2. Regressões de maturidade

Outra dinâmica notável observada por meio das Matrizes de Transição (Tabelas 11, 12, 13 e 14) foi a de que o nível de maturidade tecnológica dos projetos não só apresentou saltos ( $\Delta_{TRL} > 1$ ), conforme evidenciado anteriormente, como também apresentou casos de regressão ( $\Delta_{TRL} < 0$ ) – de TRL X para TRL X-1, X-2.... Tal fato pôde ser verificado pela existência de pares de transição que apresentaram TRLs de destino inferiores aos TRLs de origem. A Tabela 16 apresenta a distribuição das transições de regressão observadas em termos da variação absoluta de TRL ( $\Delta_{TRL}$ ).

**Tabela 16 - Dinâmica de regressão da maturidade tecnológica por Natureza**

**Software**

	Regressões								
$\Delta_{TRL}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	Total
Qtd	0	0	0	1	0	2	8	14	25
Freq	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	0,0%	8,0%	32,0%	56,0%	

**Produto**

	Regressões								
$\Delta_{TRL}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	Total
Qtd	0	0	0	1	1	2	12	32	48
Freq	0,0%	0,0%	0,0%	2,1%	2,1%	4,2%	25,0%	66,7%	

**Processo**

	Regressões								
$\Delta_{TRL}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	Total
Qtd	0	0	1	0	0	0	10	28	39
Freq	0,0%	0,0%	2,6%	0,0%	0,0%	0,0%	25,6%	71,8%	

**Estudo**

	Regressões								
$\Delta_{TRL}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	Total
Qtd	0	1	0	0	0	2	7	6	16
Freq	0,0%	6,3%	0,0%	0,0%	0,0%	12,5%	43,8%	37,5%	

De forma semelhante à análise dos dados da Tabela 15, a Tabela 16 revelou informações importantes sobre a dinâmica de regressão de maturidade tecnológica de acordo com sua Natureza. No que diz respeito aos projetos do tipo “Software” observou-se um total de 25 transições de regressão. Entre essas transições, 14 (56,0%) retrocederam para o TRL imediatamente anterior, enquanto 8 (32,0%) retrocederam dois níveis em uma única transição. Além disso, duas transições (8,0%) indicaram um retrocesso de três níveis de uma só vez, e ainda foi identificada uma última transição na qual houve um retrocesso de 5 níveis de uma só vez. Dada a caracterização já explicitada do “conceito” de cada nível de TRL, chega a ser surpreendente esses registros de retrocesso superiores a um nível de TRL.

Em relação às demais categorias, projetos do tipo “Processo” destacaram-se por terem apresentado a maior taxa de queda concentrada em  $\Delta_{TRL} = -1$  (71,8%) e as demais em  $\Delta_{TRL} = -2$  (25,6%) e  $\Delta_{TRL} = -6$  (2,6%). Já projetos do tipo “Produto” vieram em seguida concentrando 66,7% de suas regressões em  $\Delta_{TRL} = -1$ , 25,0% em  $\Delta_{TRL} = -2$ , 4,2% em  $\Delta_{TRL} = -3$ , 2,1% em  $\Delta_{TRL} = -4$  e ainda 2,1% em  $\Delta_{TRL} = -5$ . Projetos do tipo “Estudo” demonstraram uma dinâmica peculiar, diferenciando-se das demais Naturezas. Enquanto a maioria das regressões, foi identificada em  $\Delta_{TRL} = -1$ , a maior parte das regressões nos projetos da categoria “Estudo” ocorreu diretamente em  $\Delta_{TRL} = -2$ . Isso indica que, em casos de regressão nessa Natureza, foi mais provável um recuo de dois níveis de maturidade tecnológica do que apenas um, evidenciando uma tendência distinta para essa categoria de projetos. Esses dados ressaltam a variabilidade nos padrões de regressão dos projetos, indicando a possibilidade de diferentes dinâmicas de retrocesso ao longo de seus processos de desenvolvimento.

3. Proporção Regressão x Progressão

Outra observação importante acerca da dinâmica probabilística dos fluxos transitórios consistiu na investigação da proporção entre progressões e regressões por natureza de projeto. Nesse sentido, a Tabela 17 consolidou os dados das Tabelas 15 e 16, facilitando essa análise ao proporcionar uma visão integrada dessas transições.

**Tabela 17 - Proporção Regressão x Progressão por Natureza**

Natureza	Regressões	%	Progressões	%	Transições
1. Software	25	(8,5%)	268	(91,5%)	293
2. Processo	39	(15,4%)	215	(84,6%)	254
3. Produto	48	(21,2%)	178	(78,8%)	226
4. Estudo	16	(14,4%)	95	(85,6%)	111

A Tabela 17 apresenta dados sobre as regressões e progressões de TRL por natureza de projeto, discriminando os quantitativos absolutos e percentuais, além do total de transições observadas para cada natureza de projeto. A análise das proporções exibidas revelou a existência de variações entre as diferentes naturezas de projeto, destacando padrões específicos de comportamento no avanço e retrocesso de TRLs.

Os projetos de desenvolvimento de “Softwares” apresentaram a menor taxa de regressões (8,5%), indicando uma alta taxa de sucesso nas progressões, com 91,5% das transições resultando em avanço de TRL. Este comportamento sugere que, uma vez iniciados, os projetos de software apresentaram uma forte tendência de evolução contínua, enfrentando poucas dificuldades que tenham resultado em um número significativo de regressões.

Projetos do tipo “Processo” exibiram uma taxa de regressão mais elevada (15,4%) em comparação com os projetos de software. Apesar disso, a maioria das transições ainda resultou em progressões (84,6%). Essa diferença pode ser atribuída à complexidade inerente aos projetos de processo, que podem ter enfrentado mais obstáculos técnicos e de implementação, resultando em uma maior probabilidade de retrocesso.

O desenvolvimento de produtos se destacou por ter apresentado a maior taxa de regressão (21,2%) entre todas as categorias analisadas. Com uma taxa de progressão de 78,8%, esses projetos se mostraram os mais desafiadores em termos de manutenção de avanços tecnológicos contínuos. As elevadas taxas de regressão podem indicar frequentes reavaliações ou dificuldades técnicas significativas que levaram a revisões de status dos projetos.

Por fim, projetos do tipo estudo tiveram uma taxa de regressão de 14,4%, com 85,6% das transições resultando em progressões. Esses projetos mostraram um comportamento

intermediário em relação às outras categorias, indicando que, embora haja algumas dificuldades que levam a regressões, a maioria dos projetos ainda consegue avançar na escala TRL.

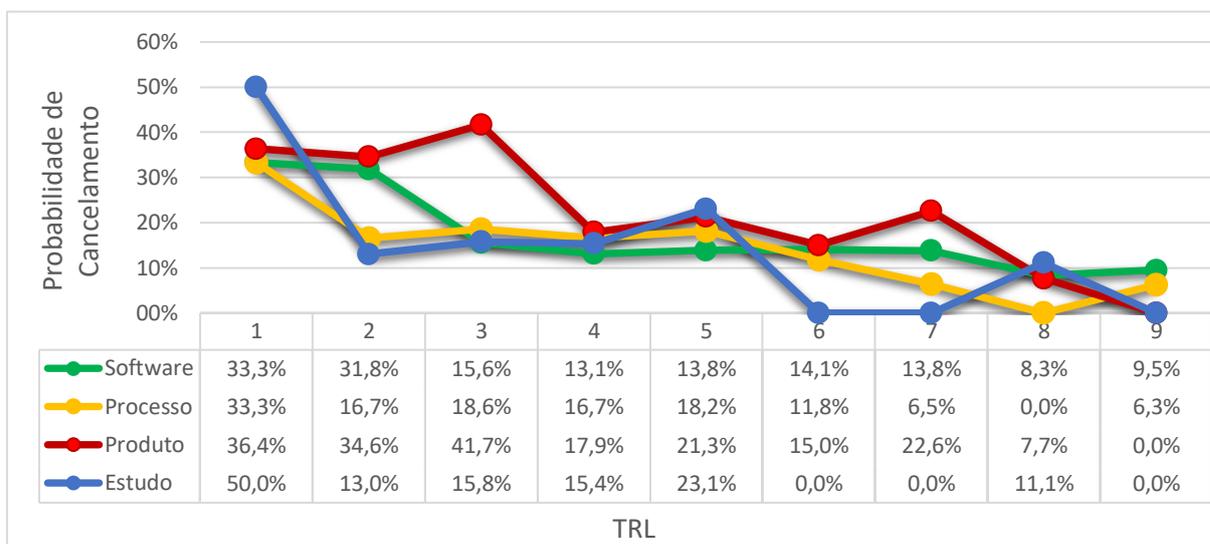
Em resumo, a análise da proporção entre regressões e progressões revelou que em todas as naturezas de projeto, a maioria das transições resultou em progressões, destacando uma tendência geral de avanço do desenvolvimento tecnológico. A influência da natureza do projeto no processo evolutivo de desenvolvimento das tecnologias foi novamente observada, com variações significativas nas taxas de regressão entre os diferentes tipos de projeto. Projetos de software apresentaram a menor taxa de regressão, enquanto projetos de produto tiveram a taxa mais alta, indicando diferentes desafios e dinâmicas no desenvolvimento tecnológico conforme a natureza do projeto. Por fim, verificou-se que a alta taxa de regressão nos projetos de produto aponta para desafios específicos que esses projetos enfrentam, possivelmente relacionados à complexidade de desenvolvimento e à necessidade de revisões técnicas. Em contrapartida, a baixa taxa de regressão e alta taxa de progressão dos projetos de software indicam uma maior resiliência e capacidade de seguir um caminho contínuo de desenvolvimento.

#### 4. Taxas de Cancelamento

Em seu estudo, Héder (2017) introduziu um indicador estatístico relacionado à dinâmica de transição de maturidade dos projetos de um portfólio, denominado por ele como "*drop-out rate*". Este conceito foi definido pelo autor como "*a fração de projetos de baixo TRL que atingem altos TRLs*" (HÉDER, 2017). Por analogia, no presente trabalho, essa métrica foi adaptada para corresponder ao percentual de projetos descontinuados em cada TRL em razão de cancelamentos, calculado pela razão entre o número de projetos cancelados em cada nível de maturidade tecnológica e o total de transições observadas nesse mesmo nível.

As métricas em questão foram detalhadas para cada uma das Naturezas de projeto analisadas, apresentadas nas Tabelas 11, 12, 13 e 14, representadas pelo percentual atribuído à coluna "Cancelados (A)". Com o propósito de proporcionar uma compreensão mais clara e uma análise comparativa do desempenho dessa métrica entre as diferentes categorias, o Gráfico 7 foi elaborado para consolidar esses percentuais em um único instrumento visual.

**Gráfico 7 - Taxa de cancelamento (*drop-out rates*) por faixa de TRL**



A análise das taxas de cancelamento por natureza de projeto ao longo dos diferentes níveis de maturidade tecnológica revelou padrões distintos e valiosos sobre a gestão de portfólios de P&D. De maneira geral, observou-se uma tendência de redução das taxas de cancelamento à medida que os projetos avançam nos níveis TRL. Tal constatação contrapôs um exercício hipotético feito por Héder (2017) que, baseado no Plano Integrado de Tecnologia da NASA, utilizou uma taxa constante de cancelamento de projetos da ordem de 15-20% por faixa. Como pode ser visto no Gráfico 8, essa hipótese não se verificou na prática, uma vez que, para todas as Naturezas de projeto, a taxa de cancelamentos seguiu uma trajetória descendente.

Em contrapartida, essa redução da probabilidade de cancelamento constatada corroborou com a perspectiva de Mankins (2009) que em uma representação gráfica do R&D<sup>3</sup> de três tecnologias genéricas ao longo da escala TRL considerou essa mesma tendência (Figura 12).

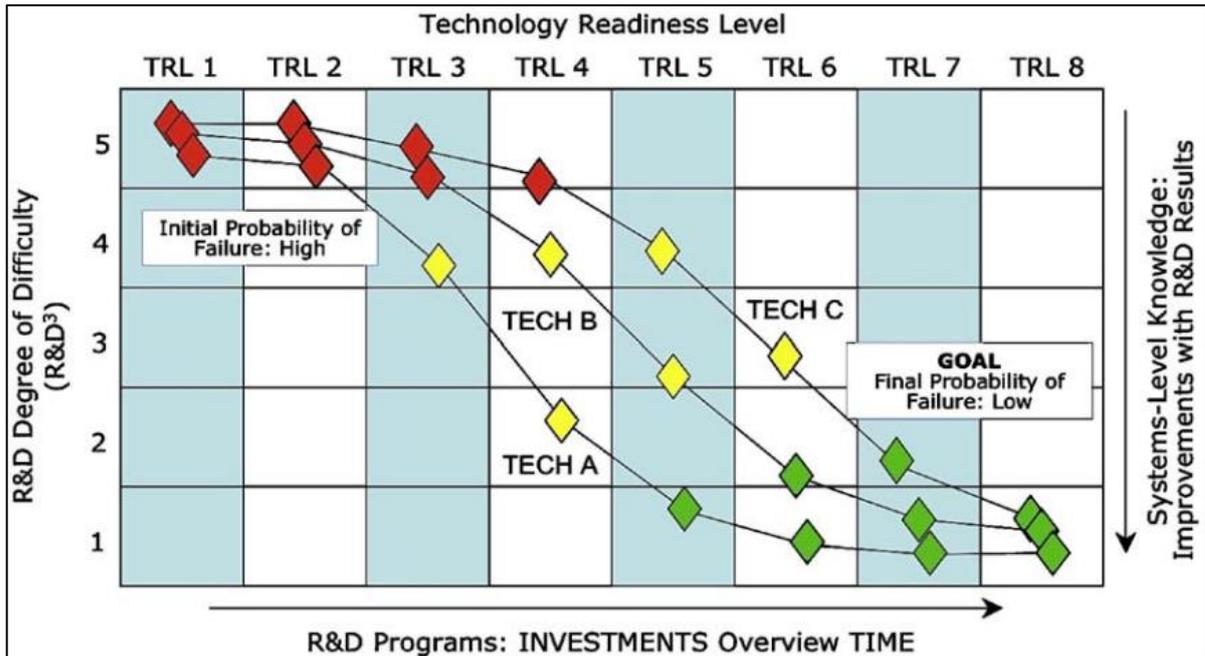


Figura 12 - Cenários genéricos do R&D<sup>3</sup> para desenvolvimento de tecnologias

Fonte: Mankins (2009)

Conforme representado por Mankins (2009), projetos em estágio inicial de desenvolvimento apresentaram maior probabilidade de falhas, mas essa probabilidade diminuiu à medida que os projetos avançaram em termos de amadurecimento tecnológico. O gráfico ainda apontou que, à medida que o grau de maturidade tecnológica se eleva, existe a expectativa de aumento dos custos de desenvolvimento. De acordo com Mankins (1995) esse aumento de custos em TRLs elevados pode ser expressivo nessas fases, representando uma parcela significativa dos custos totais de desenvolvimento final.

A observação de taxas decrescentes de cancelamento também se mostrou em consonância com as descobertas do GAO (1999), que, conforme discutido na seção de fundamentação teórica deste estudo, evidenciou uma correlação positiva entre os elevados níveis de maturidade tecnológica alcançados pelos projetos e sua maior probabilidade de sucesso. Não obstante a essa tendência geral, uma análise detalhada por Natureza de projeto revelou padrões específicos e peculiares para cada categoria de projeto.

No TRL 1, que corresponde à pesquisa básica, os projetos de Estudo apresentaram a maior taxa de cancelamento (50,0%), seguidos pelos projetos de Produto (36,4%), Software (33,3%) e Processo (33,3%). O alto índice inicial demonstrado para projetos de Estudo (50%), que se distanciou de maneira significativa dos demais, talvez possa ser explicado pelo reduzido

denominador que gerou a referida taxa. Neste nível de TRL e Natureza, só foram identificadas duas transições (Tabela 14) na amostra de trabalho filtrada, o que concentrou o resultado.

No TRL 2, que se refere à formulação das tecnologias, observou-se uma diminuição significativa na taxa de cancelamento para projetos de Estudo (13,0%), enquanto projetos de Produto (34,6%) e Software (31,8%) continuaram apresentando taxas relativamente altas. Projetos de Processo também observaram redução significativa em suas taxas de cancelamento, atingindo cerca de 16,7% nesta fase.

Ao alcançar o TRL 3, a taxa de cancelamento para projetos de Produto atingiu seu maior valor e relação às demais fases, aumentando para 41,7%. Tal fato indicou a existência de desafios significativos associados a projetos dessa Natureza durante a fase de desenvolvimento de pesquisas aplicadas. Em contrapartida, projetos de Software apresentaram uma redução drástica para 15,6%, ficando em linha com os indicadores dos projetos de Processo e Estudo que demonstraram taxas de 18,6% e 15,8%, respectivamente, refletindo uma maior resiliência dessas três categorias nesta fase.

No TRL 4, que contempla a fase de testes em escala reduzida, a taxa de cancelamento para projetos de Produto apresentou forte queda para 17,9%, sugerindo maior estabilidade nas iniciativas que alcançam esse estágio de amadurecimento. Projetos de Processo mantiveram-se relativamente estáveis com uma taxa de 16,7%, enquanto projetos de Software e Estudo apresentaram taxas de 13,1% e 15,4%. Nesse sentido, observou-se que o TRL 4 foi a fase de desenvolvimento que demonstrou maior convergência nas taxas de cancelamento de todas as categorias de projeto.

No TRL 5, a taxa de cancelamento dos projetos de Produto apresentou uma elevação para 21,3%, indicando que a etapa de testes em escala piloto apresentou novos obstáculos para esse tipo de projeto. Projetos de Processo e Software mostraram pequenas elevações, atingindo taxas de 18,2% e 13,8%, respectivamente. Contudo, a taxa de cancelamento para projetos de Estudo sofreu uma elevação considerável atingindo um pico de 23,1%, o que sugeriu dificuldades específicas para esses projetos neste nível.

Contrastando com o que foi observado no estágio anterior, ao avançar para o TRL 6, os projetos de Estudo apresentaram uma taxa nula de cancelamentos, o que indica que, ao atingir essa fase de prototipagem, esses projetos demonstraram uma grande estabilidade em comparação com as etapas anteriores. Em relação aos projetos de Software, houve uma pequena elevação na taxa de cancelamento, atingindo 14,1%. Já os projetos de Processo e Produto apresentaram taxas de

cancelamento de 11,8% e 15%, respectivamente, sinalizando uma maior continuidade em relação aos níveis anteriores. Essas observações sugerem que, na fase de prototipagem, há uma tendência geral de estabilização e menor incidência de cancelamentos, embora algumas variações ainda sejam observadas entre as diferentes naturezas de projeto.

No estágio TRL 7, houve um aumento significativo na taxa de cancelamento dos projetos de Produto, alcançando 22,6%, o que sugeriu que a fase de demonstração da tecnologia representou um novo desafio para esses projetos. Por outro lado, os projetos de Software mantiveram estabilidade, com uma taxa de cancelamento de 13,8% nesta fase. Os projetos de Processo continuaram a tendência de redução observada no estágio anterior, registrando uma taxa de cancelamento de 6,5%. Notavelmente, os projetos de Estudo mantiveram-se sem cancelamentos neste nível de maturidade.

No oitavo estágio de maturidade, correspondente à fase pré-comercial, os projetos de Produto apresentaram uma significativa queda na taxa de cancelamento em relação ao estágio anterior, atingindo 7,7%. Da mesma forma, os projetos de Software demonstraram alguma redução, com a taxa de cancelamento chegando a 8,3%. Nesta etapa, os projetos de Processo registraram, pela primeira e única vez, uma taxa nula de cancelamento, indicando a resiliência dos empreendimentos que conseguiram progredir até esse ponto. Por outro lado, os projetos de Estudo, que haviam apresentado taxas nulas nas duas fases anteriores, mostraram uma taxa de cancelamento de 11,1%, refletindo o surgimento de novos desafios e percalços nessa fase crucial do desenvolvimento.

Finalmente, no TRL 9, o último estágio de acordo com a escala proposta por Mankins (1995), correspondente à aplicação efetiva da tecnologia, foi observada uma dinâmica interessante. Empiricamente, seria de se esperar que projetos que alcançassem esse estágio não estivessem mais sujeitos a cancelamentos. No entanto, essa expectativa não se verificou para todas as Naturezas de projeto. Projetos do tipo "Produto" e "Estudo" obedeceram a essa tendência, apresentando taxas nulas de cancelamento. Contudo, projetos do tipo "Software" e "Processo" ainda apresentaram taxas de cancelamento de 9,5% e 6,3%, respectivamente. Essa descoberta revelou que, mesmo no último estágio da Escala TRL, os projetos ainda podem passar por um processo de avaliação e, portanto, continuam sujeitos a descontinuidades.

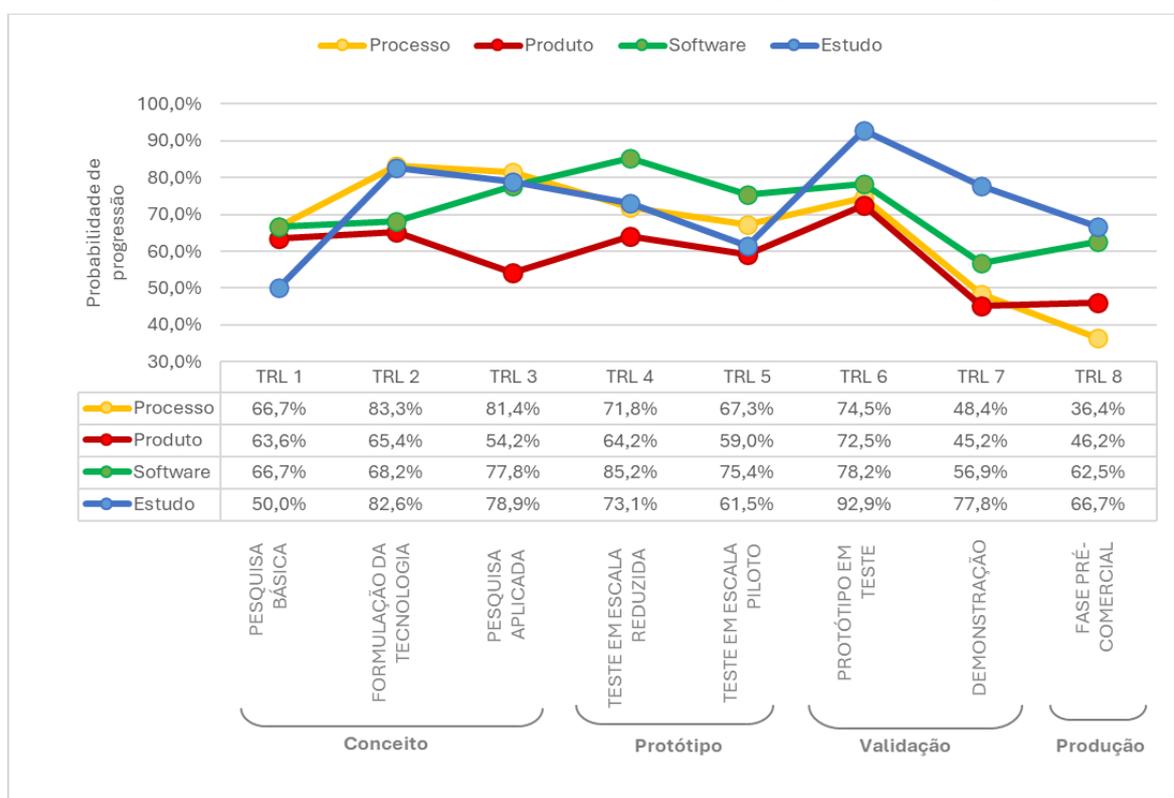
As análises aqui expostas revelaram que a natureza do projeto influenciou significativamente a probabilidade de cancelamento em diferentes níveis de maturidade tecnológica. Projetos de Estudo mostraram estabilidade nos níveis intermediários e finais. Projetos de Produto

enfrentaram desafios críticos nos níveis intermediários, enquanto aqueles que superaram esses estágios demonstraram maior estabilidade nos níveis mais altos. Projetos de Software apresentaram uma redução gradual nas taxas de cancelamento à medida que avançaram, destacando uma tendência de estabilização a partir do TRL 4. Projetos de Processo mostraram uma tendência de redução constante das taxas de cancelamento ao longo dos níveis, com notável estabilidade nos níveis mais altos.

Essa análise evidenciou as diferenças significativas nas dinâmicas de maturidade tecnológica entre as diversas categorias de projetos, proporcionando uma compreensão mais profunda das tendências de cancelamento em cada estágio de desenvolvimento.

#### 4.4. Análise dos vetores de progressão por Natureza de projeto

**Gráfico 8 - Probabilidades de Progressão do TRL por Natureza de projeto**



Os vetores de progressão, que representam o somatório das probabilidades de avanço da maturidade tecnológica a cada nível de TRL, foram apresentados na última coluna das Tabelas 11, 12, 13 e 14 para cada uma das Naturezas de projeto em análise. Para facilitar a elaboração de uma análise comparativa do comportamento dessa métrica entre as diferentes categorias, o Gráfico 8 procurou conjugar os vetores de progressão calculados para os quatro

tipos de projetos. A análise conjunta desses vetores revelou achados interessantes que foram discutidos a seguir.

No TRL 1, referente à fase de Pesquisa Básica, as probabilidades de progressão ficaram relativamente próximas entre as diferentes categorias de projetos. Projetos de Processo e Software apresentaram uma mesma taxa de progressão de 66,7%, indicando que mesmo em fase inicial já se verificou a possibilidade de cancelamentos ou regressões. Projetos de Produto e Estudo indicaram probabilidades ainda ligeiramente menores, 63,6% e 50,0%, respectivamente. Assim como apontado na análise das taxas de cancelamento, esse baixo percentual relativo dos projetos de “Estudo” pode estar associado ao reduzido número de projetos com transição a partir deste nível, o que concentrou o resultado.

Ao avançar para o TRL 2, todos os tipos de projetos mostraram um aumento nas taxas de progressão nessa etapa de Formulação das Tecnologias. Projetos de Estudo, especificamente, subiram para 82,6%, sugerindo uma recuperação robusta após o TRL 1. De maneira similar, projetos de Processo atingiram sua maior taxa de progressão neste nível, com 83,3%. Em contrapartida, os projetos de Produto e Software apresentaram crescimentos mais modestos, registrando 65,4% e 68,2%, respectivamente. Esses resultados indicaram que, enquanto alguns tipos de projetos apresentaram um incremento significativo em sua viabilidade, outros ainda enfrentaram desafios nessas fases iniciais de desenvolvimento que limitaram seu progresso.

Na etapa de execução de Pesquisas Aplicadas, TRL 3, observou-se uma convergência nas taxas de progressão para a maioria dos tipos de projetos. Projetos de Processo mantiveram a liderança com uma taxa de 81,4%, seguidos de perto por projetos de Estudo e Software, que apresentaram taxas de progressão de 78,9% e 77,8%, respectivamente. No entanto, os projetos de Produto mostraram uma queda acentuada, registrando uma taxa de progressão de apenas 54,2%. Esse resultado reforça os achados anteriores baseados nas taxas de cancelamento, que também indicaram dificuldades significativas para projetos de Produto na transição desta etapa de desenvolvimento.

No TRL 4 - Teste em Escala Reduzida - observou-se um descolamento nas taxas de progressão entre as diferentes categorias de projetos. Projetos de Software mantiveram um desempenho robusto, atingindo sua maior taxa de progressão ao longo da escala com 85,2%. Em contraste, os projetos de Processos e Estudo apresentaram uma leve redução em suas taxas de progressão, registrando 71,8% e 73,1%, respectivamente. Por outro lado, os projetos de Produto, que haviam mostrado uma queda acentuada no estágio anterior, recuperaram-se parcialmente,

alcançando uma taxa de 64,2%. Apesar dessa recuperação, a categoria de projetos de Produto continuou a apresentar a menor taxa de progressão entre todas as categorias analisadas.

No TRL 5, observou-se uma queda mais pronunciada nas taxas de progressão dos projetos de Software e Estudo, que atingiram percentuais de 75,4% e 61,5%, respectivamente. Projetos nas Naturezas correspondentes a Produtos e Processos também apresentaram quedas, embora mais suaves, reduzindo para 59,0% e 67,3%. Esse estágio de maturidade destacou-se por ser o primeiro em que todos os tipos de projetos exibiram algum grau de redução em suas taxas de progressão. Essa constatação indica que a fase de teste em escala piloto (exemplo, geração de um lote pioneiro) apresentou dificuldades que afetaram a todos os tipos de empreendimento, independentemente de sua tipologia.

Contrariando a tendência geral de queda observada no estágio anterior, no TRL 6 houve uma elevação nas taxas de progressão para todos os tipos de projetos, com destaque para os projetos do tipo Estudo, que atingiram seu ápice em taxa de progressão, alcançando 92,9%. Projetos de Software, Produto e Processo demonstraram uma convergência na faixa de 70-80% de progressão. Notavelmente, os projetos de desenvolvimento de Produtos apresentaram uma elevação significativa de 22,8% em relação ao índice anterior, a maior elevação observada por este tipo de projeto ao longo de todas as etapas de desenvolvimento. Esses resultados sugerem que o processo de filtragem de projetos praticado nas etapas anteriores à prototipagem resultou em iniciativas com maior grau de resiliência, capazes de avançar com mais robustez na etapa de prototipagem.

A fase de Demonstração, correspondente ao sétimo nível de maturidade da Escala TRL, revelou-se crucial para a compreensão da dinâmica evolutiva dos projetos. Nesta etapa, foi observada uma redução generalizada nas taxas de progressão de todas as categorias de projetos, sendo estas reduções as mais significativas em comparação com as fases anteriores. Especificamente, os projetos de Produto registraram as menores taxas de progressão, atingindo apenas 45,2%. Projetos de Processo apresentaram uma taxa ligeiramente superior, com 48,4%. Projetos de Software também experimentaram uma queda acentuada, alcançando 56,9%. Em contrapartida, os projetos de Estudo, embora afetados pela tendência de queda, mantiveram-se no topo deste nível de maturidade, com uma taxa de progressão de 77,8%. Esses resultados destacam a fase de Demonstração como um ponto crítico na trajetória de desenvolvimento, onde os desafios técnicos e operacionais se intensificam significativamente.

Finalmente, no TRL 8, observou-se dinâmicas distintas para quase todos os tipos de projeto em sua fase pré-comercial. Projetos de Estudo mantiveram a trajetória descendente já evidenciada no estágio anterior, atingindo um percentual de 66,7%. De maneira similar, os projetos de Processo seguiram essa tendência descendente, alcançando seu pior desempenho em termos de taxa de progressão, com apenas 36,4%. Esse percentual se destaca por ter sido a menor taxa de progressão observada entre todos os tipos de projetos em todas as fases de maturidade da escala, indicando que a etapa pré-comercial para esta Natureza de projeto foi dotada de graves problemáticas que impediram a maioria dos avanços das tecnologias. Em contraste, os projetos de Produto apresentaram uma leve alta, chegando a 46,2%, indicando uma melhoria modesta, mas ainda mantendo uma taxa relativamente baixa de progressões. Por fim, os projetos de Software foram os únicos a demonstrar uma recuperação mais significativa em relação à etapa anterior, subindo para 62,5%. Esses dados refletem as diferentes dificuldades e sucessos enfrentados pelos diversos tipos de projetos na fase pré-comercial da escala TRL.

A análise das taxas de progressão por nível de maturidade tecnológica (TRL) revelou importantes variações entre as Naturezas de projeto. Em resumo, pôde-se aferir que, nos níveis iniciais, as taxas de progressão foram altas, mas divergiram a partir do TRL 3, com projetos de Processo mostrando mais robustez e projetos de Produto enfrentando maiores dificuldades. No TRL 5, todas as categorias apresentaram uma queda, destacando a fase de testes em escala piloto como um ponto de dificuldade. No TRL 6, projetos de Estudo se destacaram pela resiliência, enquanto a fase de Demonstração (TRL 7) apresentou uma redução geral nas taxas de progressão, especialmente para projetos de Produto e Processo, destacando essa etapa como um ponto crítico na trajetória de desenvolvimento de todas as Naturezas de projeto. No TRL 8, projetos de Processo tiveram dificuldades significativas, enquanto projetos de Software mostraram uma recuperação notável, refletindo os diferentes comportamentos demonstrados na fase pré-comercial.

Essa análise detalhada por nível de maturidade tecnológica (TRL) evidenciou as dinâmicas distintas e os desafios enfrentados por cada tipo de projeto ao longo das diferentes fases de desenvolvimento. A identificação desses padrões oferece um valioso instrumento para os gestores, que, com esse conhecimento, dispõem de informações estratégicas essenciais para uma gestão mais eficaz dos portfólios de P&D. Isso permite ajustar estratégias de suporte e alocação de recursos de acordo com as necessidades específicas de cada tipo de projeto e fase de desenvolvimento, otimizando assim o sucesso e a eficiência dos empreendimentos tecnológicos.

#### 4.5. Análise das probabilidades de sucesso técnico por Natureza

**Tabela 18 - Probabilidades de Progressão do TRL por Natureza de projeto e grau de elevação do TRL**

##### **Probabilidades de progressão por tipo de Projeto**

<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 1 para TRL 2	66,7%	66,7%	63,6%	50,0%
TRL 1 para TRL 3	45,5%	55,6%	41,6%	41,3%
TRL 1 para TRL 4	36,2%	45,2%	22,5%	32,6%
TRL 1 para TRL 5	30,8%	32,5%	14,5%	23,8%
TRL 1 para TRL 6	23,6%	21,8%	8,5%	14,7%
TRL 1 para TRL 7	18,7%	16,6%	6,2%	13,6%
TRL 1 para TRL 8	12,3%	10,4%	2,8%	10,6%
TRL 1 para TRL 9	9,7%	4,9%	1,3%	7,9%
<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 2 para TRL 3	68,2%	83,3%	65,4%	82,6%
TRL 2 para TRL 4	54,2%	67,8%	35,4%	65,2%
TRL 2 para TRL 5	46,2%	48,7%	22,7%	47,7%
TRL 2 para TRL 6	35,4%	32,8%	13,4%	29,3%
TRL 2 para TRL 7	28,0%	24,9%	9,7%	27,2%
TRL 2 para TRL 8	18,5%	15,6%	4,4%	21,2%
TRL 2 para TRL 9	14,6%	7,3%	2,0%	15,9%
<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 3 para TRL 4	79,5%	81,4%	54,2%	78,9%
TRL 3 para TRL 5	67,8%	58,4%	34,8%	57,7%
TRL 3 para TRL 6	51,9%	39,3%	20,5%	35,5%
TRL 3 para TRL 7	41,1%	29,9%	14,9%	33,0%
TRL 3 para TRL 8	27,1%	18,7%	6,7%	25,6%
TRL 3 para TRL 9	21,4%	8,8%	3,1%	19,2%
<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 4 para TRL 5	85,2%	71,8%	64,2%	73,1%
TRL 4 para TRL 6	65,3%	48,3%	37,9%	45,0%
TRL 4 para TRL 7	51,7%	36,7%	27,5%	41,8%
TRL 4 para TRL 8	34,1%	22,9%	12,4%	32,5%
TRL 4 para TRL 9	26,9%	10,8%	5,7%	24,4%
<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 5 para TRL 6	76,6%	67,3%	59,0%	61,5%
TRL 5 para TRL 7	60,7%	51,1%	42,8%	57,1%
TRL 5 para TRL 8	40,0%	32,0%	19,3%	44,4%
TRL 5 para TRL 9	31,6%	15,0%	8,9%	33,3%
<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 6 para TRL 7	79,2%	76,0%	72,5%	92,9%
TRL 6 para TRL 8	52,3%	47,5%	32,7%	72,2%
TRL 6 para TRL 9	41,3%	22,4%	15,1%	54,2%
<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 7 para TRL 8	66,0%	62,5%	45,2%	77,8%
TRL 7 para TRL 9	52,1%	29,4%	20,8%	58,3%
<b>De-Para</b>	<b>Software</b>	<b>Processo</b>	<b>Produto</b>	<b>Estudo</b>
TRL 8 para TRL 9	78,9%	47,1%	46,2%	75,0%

A lacuna de pesquisa identificada na seção introdutória deste documento remeteu à carência de referenciais estatísticos, com base em dados, que proporcionassem melhor embasamento à métrica da "Probabilidade de Sucesso Técnico" aplicada à gestão de portfólios de projetos. Neste sentido, a Tabela 18 representou o principal achado desta pesquisa, uma vez que materializou as referidas probabilidades, obtidas com base nos fluxos de TRL apurados anteriormente. A utilização desse achado está fundamentada nas ferramentas de priorização e ordenamento de projetos delineadas por Cooper et al. (1997a, 1997b), conforme discutido na seção de fundamentação teórica deste trabalho. Segundo esses autores, tais instrumentos de gestão demandam, entre outros elementos, a aplicação de uma variável denominada " $P_{ts}$ " ou probabilidade de sucesso técnico que, em razão da falta de instrumentos de referência, é realizada de maneira empírica pela equipe de desenvolvimento dos projetos. Os valores apresentados na Tabela 18 corresponderam a essas probabilidades, obtidas por meio do processamento de uma vasta quantidade de dados históricos, o que os isentou dos vieses identificados por Rubenstein e Schröder (1977).

A primeira coluna da tabela, intitulada "De-Para", dispôs de todas as possíveis combinações de elevação de maturidade tecnológica pretendidas por um projeto em análise. Assim, a referida tabela contém 36 linhas, correspondendo a todas as possíveis trajetórias de evolução de TRL, tendo por base a escala de nove níveis proposta por Mankins (1995). As demais colunas da tabela referem-se aos diferentes tipos de projetos (naturezas) analisados neste estudo e, em suas respectivas linhas, encontram-se as probabilidades históricas de sucesso associadas a cada um deles. As probabilidades, em si, foram obtidas mediante o cálculo matemático proposto na seção de Métodos deste documento.

A Tabela 18 consiste em um instrumento de aplicação direta, portanto sua utilização pressupõe a existência de um projeto em desenvolvimento ao qual o gestor deseja elevar o nível de maturidade tecnológica de um nível atual "A" para um nível mais avançado "B". Sob esse contexto, a aplicação desse instrumento requereria três variáveis de trabalho que seriam: (1) TRL atual; (2) TRL final e (3) Natureza do projeto.

Considerando que a análise de um projeto específico não fez parte do escopo deste estudo, e que seria impraticável, e até inócua, a análise de cada um dos 36 caminhos possíveis, os comentários sobre este achado foram baseados em comparações entre as probabilidades de sucesso técnico atribuídas às quatro naturezas de projetos em estudo, focando em projetos hipotéticos que desejassem evoluir do TRL 4 para o TRL 9. A escolha dos níveis TRL atual = 4 e TRL desejado = 9 foi motivada por outros achados desta pesquisa, que revelaram uma forte

incidência desses níveis de maturidade como TRL inicial e TRL final nesta amostra de trabalho (conforme demonstrado nos Gráficos 6 e 7).

#### 1. Software (17,9%)

Os projetos de Software apresentaram uma probabilidade de 17,9% de avançar do TRL 4 para o TRL 9. Este valor foi composto a partir da multiplicação das probabilidades de progressão apuradas para os TRLs 4 a 8 desta Natureza de projeto (Tabela 11) que apresentaram os respectivos percentuais: TRL 4 = 85,2%; TRL 5 = 75,4%; TRL 6 = 78,2%; TRL 7 = 56,9% e TRL 8 = 62,5%.

A análise desses fatores multiplicativos revela que esta categoria de projeto apresentou percentuais relativamente elevados de progressão até o TRL 6, porém as dificuldades enfrentadas nas etapas de Demonstração (TRL 7) e Pré-comercial (TRL8) acabaram por comprimir sua expectativa de sucesso até os 17,9% observados. Ainda assim, este foi o segundo melhor resultado dentre as demais categorias de projetos. Reconhece-se o fato de que o software, sendo um produto intangível, geralmente envolve menos barreiras físicas e logísticas em comparação com processos ou produtos, facilitando sua evolução através dos níveis de prontidão tecnológica.

#### 2. Processo (6,3%)

A expectativa de sucesso para projetos de Natureza “Processo” elevarem-se do TRL 4 ao TRL 9 apresentou uma probabilidade de 6,3%, a segunda menor entre as categorias analisadas. Esse valor foi obtido mediante a multiplicação das taxas de progressão TRL 4 = 71,8%; TRL 5 = 67,3%; TRL 6 = 74,5%; TRL 7 = 48,4%; TRL 8 = 36,4% (Tabela 12).

A reduzida expectativa de sucesso, comparativamente ao observado nos projetos de Software, foi atribuída principalmente às dificuldades vivenciadas nas etapas de demonstração (TRL 7) e pré-comercialização (TRL 8). No entanto, para os projetos de processos, os percentuais observados indicaram dificuldades ainda mais acentuadas, com taxas de 48,4% no TRL 7 e 36,4% no TRL 8. Este último índice de progressão representou o menor desempenho para esta fase de desenvolvimento em comparação com as demais naturezas de projetos, destacando as sérias dificuldades enfrentadas por esse tipo de projeto na fase final de maturação dessas tecnologias.

### 3. Produto (5,7%)

Projetos do tipo “Produto” apresentaram a pior expectativa de sucesso técnico nesta mesma trajetória (TRL 4 ao TRL 9) dentre as demais Naturezas com a marca de 5,7%. Este resultado se mostrou ainda menor do que a taxa observada no caso dos Processos. A composição do valor mencionado formou-se por meio da multiplicação das taxas de progressão TRL 4 = 64,2%; TRL 5 = 59,0%; TRL 6 = 72,5%; TRL 7 = 45,2%; TRL 8 = 46,2% (Tabela 13).

A análise da dinâmica dos percentuais de progressão ao longo da Escala TRL evidenciou que a expectativa de sucesso reduzida esteve associada às baixas taxas de progressão observadas já nas fases de Testes em Escala Reduzida (TRL 4) e Testes em Escala Piloto (TRL 5). Esse cenário foi ainda mais agravado por obstáculos enfrentados nas etapas subsequentes de Demonstração (TRL 7) e Pré-comercial (TRL 8), resultando em uma compressão adicional das taxas de progresso.

### 4. Estudo (21,7%)

Os projetos categorizados como “Estudos”, dentre os demais, foram os que apresentaram a maior probabilidade de progressão, atingindo uma taxa de êxito de cerca de 21,7% no trajeto TRL 4 a TRL 9. Este valor foi composto pelos percentuais de progressão TRL 4 = 73,1%; TRL 5 = 61,5%; TRL 6 = 92,9%; TRL 7 = 77,8%; TRL 8 = 66,7% (Tabela 14)

Entre os percentuais que compuseram a alta taxa de sucesso observada, destacaram-se os identificados nas fases de Prototipagem (92,9%) e Demonstração (77,8%). No que se refere à fase de Prototipagem, esta categoria de projeto apresentou a maior taxa de progressão apurada, excedendo significativamente as taxas experimentadas pelas outras naturezas investigadas e alcançando quase 100% de progressões. Na fase de Demonstração, os 77,8% obtidos representaram a maior taxa de progressão, com ampla vantagem sobre as demais naturezas. A relevância desse índice foi evidenciada ao compará-lo com o segundo maior percentual de progressão nesta mesma fase de maturidade, de 56,9% (Software), revelando uma diferença de aproximadamente 36,7%.

A análise comparativa dos dados revelou diferenças significativas nas taxas de sucesso de progressão entre os diferentes tipos de projetos. Essas variações puderam ser compreendidas considerando as características intrínsecas de cada categoria. Projetos de Software e Estudos,

em razão da sua flexibilidade e menor necessidade de investimentos, mostraram uma maior probabilidade de sucesso. Por outro lado, projetos associados a Processos e Produtos enfrentaram maiores desafios que podem estar relacionados à complexidade inerente e à necessidade de recursos substanciais, resultando em menores taxas de progressão e refletindo as dificuldades adicionais encontradas na implementação e escalabilidade desses tipos de projetos.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho de pesquisa teve como principal motivação a carência de referenciais estatísticos, baseados em dados, que permitissem estabelecer, sem vieses cognitivos e conjunturais, as probabilidades de sucesso técnico esperadas para projetos de tecnologia em desenvolvimento. Nesse sentido, estruturou-se um método estatístico quantitativo que, sendo aplicável a qualquer organização que disponha de registros históricos de TRL, permite a esta aferir expectativas quanto às probabilidades de progressão de seu portfólio de projetos para cada nível da Escala TRL.

A presente pesquisa, além de desenvolver o método proposto, aplicou-o de forma prática sobre a base de dados de uma organização real de mercado que, após depuração, contemplou por 873 projetos de PD&I. Os resultados obtidos permitiram estabelecer referenciais estatísticos de progressão para cada uma das quatro naturezas de projeto investigadas: Produto, Processo, Software e Estudo. Utilizando este método inovador de análise de dados históricos de TRL, foi possível transformar registros administrativos isolados em um instrumento de inteligência de gestão, revelando métricas que refletem as dinâmicas evolutivas dos projetos da organização estudada. Esta abordagem metodológica robusta não apenas forneceu *insights* valiosos para a gestão estratégica do portfólio de P&D de organizações, mas também demonstrou um potencial de aplicabilidade universal para organizações dos diferentes ramos de atividade e setores industriais que dispõem de dados históricos de TRL. Assim, o método desenvolvido se configura como uma ferramenta versátil e poderosa para a análise e otimização de projetos de desenvolvimento tecnológico, oferecendo uma base sólida para a tomada de decisões informadas e estratégicas.

### 6.1. Resumo dos principais achados

A análise detalhada dos fluxos de progressão em cada nível de TRL permitiu observar dinâmicas como progressão e regressão de maturidade, bem como as taxas de cancelamento,

por natureza, dos projetos componentes da amostra. A partir dessas observações, foram determinados os vetores de progressão de TRL para cada categoria de projeto, o que possibilitou a identificação das probabilidades de sucesso técnico esperadas, que se configuraram como o principal achado desta pesquisa. Além disso, foi realizada uma análise descritiva da base de trabalho em termos de sua distribuição por Natureza, Status, TRLs iniciais e finais. No entanto, este autor entendeu que esses últimos resultados possuem caráter conjuntural e, portanto, não foram destacados nesta seção.

No que diz respeito ao comportamento das progressões de maturidade tecnológica, foi observado que estas não ocorrem integralmente de maneira linear. No entanto, a incidência das progressões não sequenciais se mostrou proporcionalmente baixa. Dessa forma, este estudo pôde validar, com base em dados, a hipótese de progressões lineares proposta empiricamente por Héder (2017). Já em relação às regressões, a análise da base de trabalho não só evidenciou a existência desse comportamento como diferentes perfis de retrocesso de maturidade em cada uma das naturezas de projeto. Ainda assim, a análise da proporção entre regressões e progressões revelou que, em todas as naturezas de projeto, a maioria das transições resultou em progressões, destacando uma tendência geral de progressão em TRL.

As investigações acerca do indicador da taxa de cancelamento (*drop-out rate*) introduzido por Héder (2017) também apresentaram achados relevantes. De maneira geral, observou-se uma tendência de redução das taxas de cancelamento à medida que os projetos avançam nos níveis TRL. Essa constatação contrapõe a visão de cancelamentos constantes adotada por Héder (2017) e corroborou com a perspectiva de Mankins (2009) que em seu estudo do R&D<sup>3</sup> apresentou expectativas decrescentes acerca das dificuldades enfrentadas pelos projetos que elevam seus graus de maturidade tecnológica.

A análise detalhada dos vetores de progressão por natureza de projeto revelou variações significativas nas taxas de progressão entre os diferentes tipos de projetos nos diversos níveis de TRL. Essas taxas variaram de forma considerável conforme os projetos avançavam nas fases de maturidade tecnológica, destacando tendências e padrões específicos para cada categoria.

Observou-se que as taxas de progressão no TRL 1 foram semelhantes para projetos de Processo, Software e Produto, enquanto os projetos de Estudo apresentaram percentuais um pouco menores logo no início. À medida que os projetos avançaram para o TRL 2, houve um aumento nas taxas de progressão em todas as categorias, com destaque para os projetos de Estudo e Processo, que alcançaram taxas de 82,6% e 83,3%, respectivamente. No entanto, essa tendência

positiva não se manteve uniformemente nos níveis subsequentes. Na fase de pesquisas aplicadas (TRL 3), os projetos de Produto enfrentaram uma queda acentuada em suas taxas de progressão, registrando apenas 54,2%, enquanto os projetos de Processo continuaram a liderar com 81,4%. A análise dos TRLs mais avançados evidenciou desafios específicos em fases críticas do desenvolvimento. No TRL 5, todas as categorias de projetos apresentaram uma queda nas taxas de progressão, destacando a fase de testes em escala piloto como um ponto de dificuldade comum a todos os tipos de empreendimentos. Essa tendência de dificuldade foi ainda mais acentuada no TRL 7, a fase de demonstração, onde as reduções nas taxas de progressão foram as mais significativas, especialmente para os projetos de Produto e Processo, que registraram taxas de progressão de 45,2% e 48,4%, respectivamente. Esses resultados indicam que os desafios técnicos e operacionais se intensificam consideravelmente nessa etapa, tornando-a um ponto crítico na trajetória de desenvolvimento.

Os projetos de Estudo destacaram-se pela sua resiliência, atingindo a maior taxa de progressão observada no TRL 6, com significativos 92,9%. Este desempenho indica que o processo de filtragem e refinamento nas etapas anteriores resultou em iniciativas mais robustas e capazes de avançar eficazmente na fase de prototipagem. Em contraste, os projetos de Software mostraram um desempenho sólido até o TRL 6, seguido por uma queda acentuada nas taxas de progressão. Embora tenham apresentado uma leve recuperação no TRL 8, evidenciou-se que as fases de demonstração e pré-comercial continuam a representar desafios significativos para esses projetos. Os projetos de Produto e Processo enfrentaram dificuldades semelhantes nas fases avançadas de desenvolvimento, porém com dinâmicas distintas nas etapas iniciais. Enquanto os projetos de Produto encontraram desafios persistentes a partir do TRL 3, os projetos de Processo mantiveram uma performance dentro da média até o TRL 6, mas experimentaram quedas substanciais em suas taxas de progressão após essa fase, culminando na menor taxa geral de progressão dentre todas as naturezas com apenas 36,4% no TRL 8. Esses resultados evidenciaram as complexidades e obstáculos enfrentados pelos diferentes tipos de projetos ao longo de seu ciclo de desenvolvimento.

## **6.2. Contribuições do estudo**

A presente pesquisa e seus achados enriquecem significativamente o arcabouço teórico existente e beneficiam pesquisadores acadêmicos interessados na temática, ao fornecer perspectivas baseadas em dados reais sobre a dinâmica evolutiva de projetos na escala TRL. Ao proporcionar uma análise detalhada de como os projetos tecnológicos progridem através dos diferentes níveis de prontidão tecnológica, este estudo contribui para uma melhor aferição da

expectativa de sucesso técnico de empreendimentos tecnológicos. Além disso, o método de tratamento de dados desenvolvido para a composição da Matriz de Transição TRL representa uma importante contribuição metodológica. Este método oferece um conjunto de instruções padronizadas para a modelagem de dados e a composição de amostras, o que permitirá que outros estudiosos conduzam análises semelhantes com informações de diferentes organizações, ampliando assim o escopo e a aplicabilidade das conclusões deste estudo.

É importante destacar que, em razão do caráter genérico do processo de transformação e análise de dados, este método não está restrito à escala TRL. Ele pode ser aplicado a outras métricas de aferição de maturidade que monitoram a evolução de projetos de P&D ao longo do tempo. Isso amplia significativamente o potencial de aplicação do método proposto por este estudo, permitindo que diferentes setores e tipos de projetos tecnológicos utilizem esta abordagem para melhorar a gestão e o planejamento de suas atividades de desenvolvimento e inovação.

Outra classe diretamente beneficiada por este estudo são os profissionais de gestão de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica. Os achados fornecem melhores referências sobre o fluxo médio de progressão dos projetos por natureza ao longo da escala TRL, auxiliando no planejamento e orçamentação de seus portfólios. Essas referências são particularmente úteis para a tomada de decisões estratégicas, permitindo que os gestores aloquem recursos de maneira mais produtiva e desenvolvam estratégias que aumentem as chances de sucesso técnico de seus projetos. Conforme postulado por Mankins (2002), a programação e o fluxo evolutivo esperado de um portfólio são essenciais para realizar essas atividades de maneira eficaz. O conhecimento detalhado das probabilidades de sucesso técnico em cada estágio da escala TRL proporciona uma base sólida para essas decisões.

Especificamente no aspecto orçamentário, a estratégia estabelecida pela OAST (1991) em seu Plano Integrado de Tecnologia indica que cerca de um terço do orçamento destinado a P&D deve apoiar projetos em níveis iniciais de maturidade (TRL 1 a 5), enquanto o restante deve ser alocado a projetos em níveis mais avançados. Essa abordagem, que utiliza o grau de maturidade esperado dos projetos como referencial para a alocação de recursos, evidencia o valor agregado pelas métricas estabelecidas nesta pesquisa. Ao fornecer uma análise quantitativa detalhada das probabilidades de progressão dos projetos ao longo da escala TRL, este estudo oferece uma ferramenta valiosa para a otimização da alocação de recursos financeiros, ajudando a garantir que os investimentos em P&D sejam direcionados de maneira a maximizar o retorno e a eficiência.

Vale ressaltar que os dispêndios financeiros associados a ações de P&D são significativos tanto no setor privado quanto no público. Segundo o MCTI (2023), o gasto brasileiro em P&D no ano de 2020 foi da ordem de R\$ 87,1 bilhões. Portanto, uma alocação eficiente desse volume de capital tem o potencial de exercer impactos relevantes nos resultados das empresas e na utilização de recursos públicos. A aplicação das métricas e métodos desenvolvidos neste estudo pode contribuir para uma gestão mais eficaz desses recursos, melhorando o desempenho e a competitividade das organizações. Além disso, ao permitir uma melhor compreensão das dinâmicas de evolução tecnológica, este estudo ajuda a promover uma cultura de inovação mais robusta e bem-informada, capacitando tanto gestores quanto pesquisadores a tomarem decisões mais embasadas e estratégicas.

### **6.3. Limitações da pesquisa**

A pesquisa em análise, apesar de suas contribuições substanciais para a temática investigada, apresentou algumas limitações inerentes à sua metodologia. Uma das principais limitações residiu na abordagem das métricas de progressão, que isolaram o fator tempo. Ao tratar as transições de níveis de maturidade tecnológica sem levar em conta o tempo decorrido, a análise atribuiu igual importância a transições imediatas e àquelas que ocorreram em intervalos temporais mais extensos. Essa abordagem pode ter restringido a sensibilidade da análise, uma vez que não diferenciou projetos que progrediram rapidamente daqueles que avançaram de forma mais lenta. Reconhecer a relevância do fator tempo é importante, pois ele pode enriquecer futuras análises e oferecer uma visão ainda mais detalhada das trajetórias de desenvolvimento tecnológico. A inclusão da variável temporal em pesquisas subsequentes poderia proporcionar *insights* adicionais sobre a eficiência dos processos de inovação e desenvolvimento, destacando áreas para possíveis otimizações e identificando obstáculos persistentes que retardam o avanço.

Ainda assim, é importante ressaltar que a ausência da análise temporal não diminuiu a importância e a validade das conclusões desta pesquisa. A abordagem adotada permitiu uma compreensão clara e objetiva das dinâmicas evolutivas dos projetos tecnológicos, focando nas transições entre os níveis de maturidade e nas probabilidades de sucesso técnico. Portanto, mesmo sem considerar a dimensão temporal, os achados forneceram *insights* valiosos sobre as características operacionais e os padrões de evolução dos projetos dentro da organização estudada para cada uma das naturezas analisadas. Em suma, embora a ausência da análise temporal represente uma área de melhoria para estudos futuros, a pesquisa atual continua a oferecer contribuições significativas para a compreensão das dinâmicas de maturidade

tecnológica. Incorporar a dimensão temporal em futuras investigações certamente enriquecerá a análise, mas as conclusões presentes já fornecem uma base robusta para a formulação de estratégias mais eficazes na gestão de portfólios de P&D.

Além desse primeiro aspecto, a limitação associada ao horizonte temporal investigado, definido em 23 meses pela base bruta extraída, pode ter subestimado a complexidade da maturação tecnológica em casos em que esse processo demandou prazos mais amplos. Projetos tecnológicos, especialmente aqueles que envolvem inovação radical ou o desenvolvimento de novas tecnologias, possivelmente requerem períodos extensos para atingir níveis mais elevados de prontidão tecnológica. A restrição imposta pelo horizonte temporal pode, portanto, não ter capturado adequadamente as nuances e desafios enfrentados durante a evolução desses projetos. No entanto, é crucial reconhecer que a análise realizada fornece um panorama representativo e valioso das dinâmicas de maturação tecnológica dentro do período considerado.

Embora esta limitação temporal possa ter influenciado a precisão das conclusões derivadas, a pesquisa ainda oferece percepções importantes sobre as fases críticas de progressão tecnológica e os fatores que contribuem para o sucesso técnico dos projetos. A ausência de um intervalo de pesquisa maior não invalida os resultados obtidos; pelo contrário, enfatiza a necessidade de futuras investigações que incorporem horizontes temporais mais amplos. Abordagens metodológicas que incluam uma consideração mais robusta da dimensão temporal poderiam permitir uma análise mais aprofundada e detalhada da progressão tecnológica, enriquecendo a compreensão sobre a evolução dos projetos ao longo do tempo e proporcionando uma base ainda mais sólida para a gestão estratégica de portfólios de P&D.

#### **6.4. Sugestões para futuras pesquisas**

A subseção anterior, dedicada às limitações da pesquisa, apresentou previamente algumas sugestões para aperfeiçoamento dos achados deste trabalho, associadas às limitações apontadas. Entre essas sugestões, destacaram-se a inclusão do fator tempo no processo de análise e a ampliação do intervalo temporal contemplado. Contudo, é relevante adicionar uma terceira sugestão externa ao espectro temporal do desenvolvimento de tecnologias.

Além dos obstáculos vivenciados pelos projetos durante o processo de desenvolvimento das tecnologias, estes também enfrentam outros significativos desafios durante a fase de comercialização, como a captação de investimentos do setor privado, custos que excedem as expectativas iniciais e mudanças no contexto de mercado que podem tornar os objetivos originais não mais viáveis comercialmente. Nesse sentido, a inclusão da dinâmica evolutiva da

maturidade comercial dos projetos, em conjunto com o seu amadurecimento tecnológico, representaria um avanço crucial para a compreensão abrangente dos processos de inovação e desenvolvimento.

O *Commercial Readiness Index* (CRI), desenvolvido pela COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (2014) especificamente para avaliar a prontidão comercial de tecnologias no setor de energia renovável, oferece uma estrutura metodológica robusta para essa análise. Este índice reconhece que a maturidade tecnológica, por si só, não garante o sucesso comercial de uma solução. Mesmo tecnologias avançadas podem enfrentar desafios significativos relacionados à sua aceitação no mercado, custos de produção, viabilidade econômica e outros fatores comerciais que não são capturados pela escala TRL.

A introdução do CRI ou alguma outra métrica análoga neste tipo de análise permitiria explorar empiricamente como diferentes níveis de maturidade tecnológica se correlacionam com a capacidade dos projetos de serem comercialmente viáveis. Essa perspectiva se mostra essencial porque, muitas vezes, a atratividade de um produto no mercado depende não apenas de quão avançada é a tecnologia por trás dele, mas também de quanto está alinhada com as necessidades e demandas do mercado consumidor. Além disso, a análise integrada de maturidade tecnológica e comercial poderia revelar padrões complexos de desenvolvimento e ajudar na identificação de pontos críticos onde intervenções estratégicas são necessárias para maximizar tanto o impacto tecnológico quanto o retorno financeiro dos investimentos em P&D.

Essa abordagem integrativa não apenas alinha as estratégias de desenvolvimento tecnológico com as metas comerciais, mas também permite uma alocação mais eficiente de recursos e uma mitigação mais eficaz dos riscos associados ao ciclo de vida do projeto. Portanto, ao incluir o CRI não apenas se estaria fortalecendo a análise dos achados existentes, mas também se estaria posicionando a pesquisa em um contexto mais amplo de gestão estratégica de inovação, capaz de informar decisões fundamentadas na transição de tecnologias do laboratório para o mercado.

## **6.5. Considerações finais**

No que diz respeito ao método de processamento e análise de dados proposto por esse trabalho, é importante destacar que este foi elaborado de forma a possibilitar sua aplicação a qualquer organização que disponha dos dados históricos de TRL de seus projetos. Nesse sentido, esta pesquisa forneceu um modelo metodológico robusto e adaptável, permitindo que diferentes organizações, independentemente de suas áreas de atuação ou estrutura tecnológica, possam utilizar essa abordagem para analisar a evolução de seus projetos no âmbito de um

portfólio de P&D. A aplicabilidade universal do método garante que os gestores que venham a utilizá-lo possam obter *insights* valiosos sobre as dinâmicas de progresso tecnológico e as probabilidades de sucesso técnico de seus empreendimentos, que permitirão a tomada de decisões estratégicas informadas e a otimização dos recursos alocados em P&D. Além disso, estudos acadêmicos futuros que tenham acesso a outras bases de dados históricos de TRL poderão aplicar este método em diferentes perfis organizacionais. Isso permitirá a obtenção de referenciais de progressão segmentados por setor, atendendo assim a uma das lacunas de pesquisa destacadas por Héder (2017). A aplicação deste método a diversos contextos organizacionais apresenta potencial de enriquecer o conhecimento sobre a evolução tecnológica em distintos setores, como também de contribuir para o desenvolvimento de estratégias de gestão de P&D mais eficazes e adaptadas às particularidades de cada ramo de atividade e setor industrial.

No entanto, embora o método desenvolvido nesta pesquisa seja aplicável a qualquer organização que faça a gestão de seus projetos por meio da Escala TRL, é fundamental ressaltar que os achados finais desta pesquisa, expressos por meio da análise da distribuição dos projetos na amostra, nas matrizes de transição TRL e suas dinâmicas, nos vetores de progressão TRL, e nas probabilidades de sucesso técnico esperadas refletiram, especificamente, as dinâmicas evolutivas dos empreendimentos da organização estudada. Tendo em vista que as métricas obtidas mediante a aplicação do método proposto foram diretamente influenciadas pelas características operacionais dessa organização, como área de atuação, estrutura tecnológica, recursos financeiros e humanos, política de inovação e processos internos, estas não devem ser interpretadas como resultados padrão. Desse modo, esse estudo não teve como pretensão estabelecer referenciais genéricos e atemporais aplicáveis a qualquer perfil de organização envolvida no desenvolvimento de projetos tecnológicos. Ainda assim, a análise bibliográfica aqui desenvolvida revelou que grande parcela dos estudos publicados sobre a temática da Escala TRL o fez sob seu aspecto estático. Portanto, mesmo que estes achados reflitam um perfil organizacional específico, ainda constituem uma importante contribuição para o arcabouço literário acadêmico.

Diante disso, conclui-se que esta pesquisa possui relevância substancial tanto no âmbito acadêmico quanto no prático, oferecendo uma abordagem inovadora e fundamentada para aprimorar as práticas de gestão de portfólio de projetos de inovação. Ao preencher uma lacuna de conhecimento e fornecer ferramentas estratégicas para os gestores, este trabalho tem o

potencial de impactar positivamente a eficácia e eficiência das organizações no gerenciamento de projetos de inovação tecnológica.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL NAQBIA, E.; ALSHURIDEHB, M.; ALHAMADC, A.; AL, B. “The impact of innovation on firm performance: a systematic review”. **International Journal of Innovation, Creativity and Change**, v. 14, n. 5, p. 31-58, 2020.

ALEINA, S. C.; VIOLA, N.; FUSARO, R. & SACCOCCIA, G. “Effective methodology to derive strategic decisions from ESA exploration technology roadmaps”. **Acta Astronautica**, v. 126, p. 316-324, 2016.

ALEXANDER, C. “Parametric cost and schedule modeling for early technology development”. **Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration**, 2018.

BANKE, J. “Technology Readiness Levels Demystified”. National Aeronautics and Space Administration. Ago. 2010. <Disponível em: <https://www.nasa.gov/aeronautics/technology-readiness-levels-demystified/>>. Acesso em: 29 nov. 2023

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. “Indicadores Nacionais de Ciência, Tecnologia e Inovação 2022”. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/indicadores>> Acesso em: 30 nov. 2023.

BRASIL. “Portaria nº 6499, de 17 de outubro de 2022. Dispõe sobre o uso do Sistema de Medição e Identificação do Nível de Maturidade Tecnológica dos projetos desenvolvidos no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e de suas unidades vinculada”. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, nº 199, Seção 1, p. 31, 19 out. 2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mcti-n-6.449-de-17-de-outubro-de-2022-437609158>>. Acesso em: 30 nov. 2023.

BILBRO, J. W. “Systematic Assessment of the Program/Project Impacts of Technological Advancement and Insertion”. George C. Marshall Space Flight Center, 2006.

CHRISTENSEN, C.; RAYNOR, M. “**The innovator's solution: Creating and sustaining successful growth**”. Harvard Business Review Press, 2013.

COMMONWEALTH OF AUSTRALIA (Australian Renewable Energy Agency). “Commercial readiness index for renewable energy sectors”. 2014. <Disponível em: <http://arena.gov.au/files/2014/02/Commercial-Readiness-Index.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2023

COOPER, R. G.; EDGETT, S. J.; KLEINSCHMIDT, E. “Portfolio management in new product development: Lessons from the leaders I”. **Research Technology Management**, v. 40, n. 5, p. 16-29, 1997a.

COOPER, R. G.; EDGETT, S. J.; KLEINSCHMIDT, E. “Portfolio management in new product development: Lessons from the leaders II”. **Research Technology Management**, v. 40, n. 6, p. 43-53, 1997b.

COOPER, R. G. “Perspective: The Stage-Gate®. idea-to-launch process-update, what's new, and NexGen systems”. **Journal of Product Innovation Management**, v. 25, n. 3, p. 213-232, May 2008

COOPER, R. G.; SOMMER, A. F. “New-product portfolio management with agile: challenges and solutions for manufacturers using agile development methods”. **Research-Technology Management**, v. 63, n. 1, p. 29-38, 2020.

COOPER, R. G.; SOMMER, A. F. “Dynamic portfolio management for new product development”. **Research-Technology Management**, v. 66, n. 3, p. 19-31, 2023.

DANNEELS, E. “The dynamics of product innovation and firm competences”. **Strategic management journal**, v. 23, n. 12, p. 1095-1121, 2002.

DAVIS, J.; FUSFELD, A.; SCRIVEN, E.; TRITLE, G. “Determining a project's probability of success”. **Research-Technology Management**, v. 44, n. 3, p. 51-57, 2001.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). “Escala de maturidade tecnológica TRL/MRL”. Brasília, ago. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/escala-dos-niveis-de-maturidade-tecnologica-trl-mrl>>. Acesso em: 30 nov. 2023

ESA (European Space Agency). “Technology Readiness Levels Handbook For Space Applications”. 2008. Disponível em: [https://connectivity.esa.int/sites/default/files/TRL\\_Handbook.pdf](https://connectivity.esa.int/sites/default/files/TRL_Handbook.pdf)

FARIDA, I.; SETIAWAN, D. “Business strategies and competitive advantage: the role of performance and innovation”. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 8, n. 3, p. 163, 2022.

FELDMAN, S. P. “Micro matters: The aesthetics of power in NASA’s flight readiness review”. **The journal of applied behavioral science**, v. 36, n. 4, p. 474-490, 2000.

FENG, C.; MA, R.; JIANG, L. “The impact of service innovation on firm performance: a meta-analysis”. **Journal of Service Management**, v. 32, n. 3, p. 289-314, 2021. DOI: 10.1108/JOSM-03-2019-0089.

GAO. “Best Practices: Better Management of Technology Development Can Improve Weapon System Outcomes”. United States General Accounting Office. 1999. <Disponível em: <http://www.gao.gov/products/NSIAD-99-162>>

GAO. “Technology Readiness Assessment Guide: Best Practices for Evaluating the Readiness of Technology for Use in Acquisition Programs and Projects”. United States General Accounting Office. 2020. <Disponível em: <https://www.gao.gov/assets/d2048G.pdf>>

GORSSE, S.; HUTCHINSON, C.; GOUNÉ, M.; BANERJEE, R. “Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys”. **Science and Technology of advanced Materials**, v. 18, n. 1, p. 584-610, 2017.

HANA, U. “Competitive advantage achievement through innovation and knowledge”. **Journal of competitiveness**, v. 5, n. 1, p. 82-96, 2013.

HÉDER, M. "From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation", **The Innovation Journal**, v. 22, n. 2, p. 3, 2017.

JAFARZADEH, H., HEIDARY-DAHOOIE, J., AKBARI, P., QORBANI, A. “A project prioritization approach considering uncertainty, reliability, criteria prioritization, and robustness”. **Decision Support Systems**, v. 156, p. 113731, 2022.

JESUS, G. T.; CHAGAS JR, M. “A importância de práticas de verificação e validação no processo de avaliação de métricas de maturidade”. In: **WETE-Workshop Em Engenharia e Tecnologia Espaciais, São José dos Campos, Brasil: INPE**,. 2017.

KLINE, S. J.; ROSENBERG, N. “An overview of innovation”. **Studies on science and the innovation process: Selected works of Nathan Rosenberg**, p. 173-203, 2010.

MANKINS, J. C. “Technology Readiness Levels A White Paper”. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington DC, 1995.

MANKINS, J. C. “Research & Development Degree of Difficulty (R&D<sup>3</sup>) A White Paper”. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington DC, v. 10, mar. 1998. Disponível em: <<https://www.economicwebinstitute.org/essays/nasadiff.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2023

MANKINS, J. C. "Approaches to strategic research and technology (R&T) analysis and road mapping", **Acta Astronautica**, v. 51, n. 1–9, p. 3–21, 2002. DOI: 10.1016/S0094-5765(02)00083-8.

MANKINS, J. C. "Technology readiness assessments: A retrospective", **Acta Astronautica**, v. 65, n. 9–10, p. 1216–1223, nov. 2009. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.058. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>>.

MARKOWITZ, H. “Portfolio Selection”. **The Journal of Finance**, v. 7, n. 1, p. 77-91, 1952.

MOORHOUSE, D. J. “Detailed definitions and guidance for application of technology readiness levels”. **Journal of Aircraft**, v. 39, n. 1, p. 190-192, 2002.

MORBAY, G. K. “R&D: Its relationship to company performance”. **Journal of Product Innovation Management: An international publication of the product development & management association**, v. 5, n. 3, p. 191-200, 1988.

OAST (Office of Aeronautical and Space Technology). “Integrated Technology Plan for the Civil Space Program”. Houston: NASA (National Aeronautics and Space Administration), 1991. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19920022390>>.

OECD. “**Gross domestic spending on R&D (indicator)**”. DOI: 10.1787/d8b068b4-en. Acesso em 06 de novembro de 2023. Disponível em: <https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm>

OLECHOWSKI, A. L., EPPINGER, S. D., JOGLEKAR, N. "Technology readiness levels at 40: A study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities". 2015-Sept, 2015. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 2015. p. 2084–2094. DOI: 10.1109/PICMET.2015.7273196.

OLECHOWSKI, A. L.; EPPINGER, S. D., JOGLEKAR, N., et al. "Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities", **Systems Engineering**, v. 23, n. 4, p. 395–408, 1 jul. 2020. DOI: 10.1002/sys.21533.

PIERRO, B. “Inovações induzidas”. **Revista FAPESP**, Edição 279, São Paulo, mai. 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/inovacoes-induzidas/>>. Acesso em: 29 nov. 2023

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. “**The standard for portfolio management**”. 3ª ed. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, Inc., 2013

RAUEN, A. T.; BARBOSA, C. M. M. “Encomendas tecnológicas no Brasil: guia geral de boas práticas.” Brasília: Ipea, 2019. ISBN: 978-85-7811-346-9. <Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/190116\\_encomendas\\_tecnologicas.pdf](https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/190116_encomendas_tecnologicas.pdf)>.

REAGAN, R. “National Space Policy”. **National Archives and Records Administration** Washington DC: The White House. 1988

RUBENSTEIN, A. H.; SCHRÖDER, H. “Managerial differences in assessing probabilities of technical success for R&D projects”. **Management Science**, v. 24, n. 2, p. 137-148, 1977.

SADIN, S. R., POVINELLI, F. P., ROSEN, R. "The NASA technology push towards future space mission systems", **Acta Astronautica**, v. 20, p. 73–77, 1989.

SCHRÖDER, H. “The quality of subjective probabilities of technical success in R & D”. **R&D Management**, v. 6, n. 1, p. 15-22, 1975.

TEECE, D. J. “Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance”. **Strategic management journal**, v. 28, n. 13, p. 1319-1350, 2007.

TIDD, J., BESSANT, J. “**Gestão da Inovação**”. 5ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2015.

TOMASCHEK, K.; OLECHOWSKI, A.; EPPINGER, S.; JOGLEKAR N. "A Survey of Technology Readiness Level Users". **INCOSE International Symposium**, v. 26, n. 1, p. 2101-2117, 2016.

YIN, K. R. “**Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**”. 5ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2015.