

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
MESTRADO PROFISSIONAL EM
INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E PROPRIEDADE INTELECTUAL

MATHEUS OLIVEIRA AZZI

**DA PESQUISA AO PRODUTO:
DOIS CASOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS QUE
ALCANÇARAM AVANÇOS EM MATURIDADE TECNOLÓGICA ATRAVÉS DE
CONQUISTAS DE RECURSOS**

Belo Horizonte
2023

Matheus Oliveira Azzi

Da pesquisa ao produto:

Dois casos da Universidade Federal de Minas Gerais que alcançaram avanços em Maturidade Tecnológica através de conquistas de Recursos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual.

Área de Concentração: Gestão da Inovação e Empreendedorismo.

Professora Orientadora: Prof. Dra. Márcia Siqueira Rapini

Belo Horizonte
2023

043

Azzi, Matheus Oliveira.

Da pesquisa ao produto: dois casos da Universidade Federal de Minas Gerais que alcançaram avanços em maturidade tecnológica através de conquistas de recursos [manuscrito] / Matheus Oliveira Azzi. – 2023.

83 f. : il. ; 29,5 cm.

Orientador: Márcia Siqueira Rapini.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual.

1. Inovação. 2. Desenvolvimento Tecnológico. 3. Transferência de Tecnologia. 4. Universidades. I. Rapini, Márcia Siqueira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. III. Título.

CDU: 608.5

“DA PESQUISA AO PRODUTO: DOIS CASOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS QUE ALCANÇARAM AVANÇOS EM MATURIDADE TECNOLÓGICA ATRAVÉS DE CONQUISTAS DE RECURSOS”

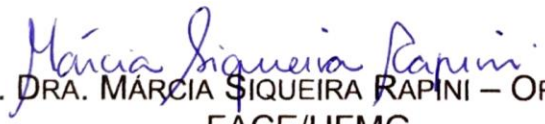
MATHEUS OLIVEIRA AZZI

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 27 de fevereiro de 2023, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes membros:


PROF. DR. ADO JÓRIO DE VASCONCELLOS
ICEx/UFMG


PROF. DR. CARLOS BASÍLIO PINHEIRO
ICEx/UFMG


PROFA. DRA. JULIANA CORRÊA CREPALDE MEDEIROS
CTIT/UFMG


PROFA. DRA. MÁRCIA SIQUEIRA RAPINI – ORIENTADORA
FACE/UFMG

Instituto de Ciências Biológicas – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2023



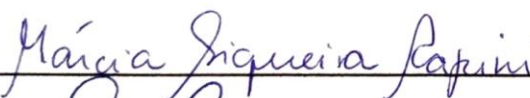
Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Biológicas
Departamento de Fisiologia e Biofísica
Mestrado Profissional Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual

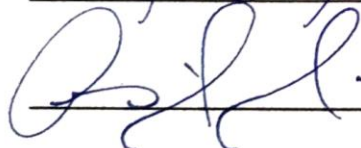


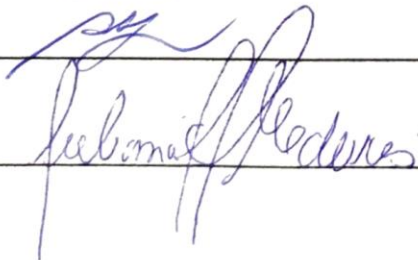
ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 171 de Matheus Oliveira Azzi

Às 09:00 horas do dia 27 de fevereiro de 2023, no Auditório 4 da FACE, realizou-se a sessão pública para a defesa da Dissertação de Matheus Oliveira Azzi. A presidência da sessão coube à Profa. Dra. Márcia Siqueira Rapini, FACE/UFMG – Orientadora. Inicialmente a Presidente fez a apresentação da Comissão Examinadora assim constituída: PROF. DR. ADO JÓRIO DE VASCONCELLOS, ICEX/UFMG; Prof. Dr. Carlos Basílio Pinheiro, ICEX/UFMG; Profa. Dra. Juliana Corrêa Crepalde Medeiros, CTIT/UFMG - Suplente; e Profa. Dra. Márcia Siqueira Rapini, FACE/UFMG – Orientadora. EM seguida, o candidato fez a apresentação do trabalho que constitui sua Dissertação de Mestrado, intitulada “DA PESQUISA AO PRODUTO: DOIS CASOS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS QUE ALCANÇARAM AVANÇOS EM MATURIDADE TECNOLÓGICA ATRAVÉS DE CONQUISTAS DE RECURSOS”. Seguiu-se a arguição pelos examinadores e, logo após, a Comissão reuniu-se, sem a presença do candidato e do público e decidiu considerar aprovada a Dissertação de Mestrado. O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pela Presidente da comissão. Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ata que, depois de lida, se aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2023.

Assinatura dos membros da banca examinadora:







AGRADECIMENTOS

Hora ou outra me questiono se as trajetórias que tomei na vida foram as melhores. E todas as vezes que me pego com essa pergunta na cabeça eu tento desviar os meus pensamentos de uma resposta clara e definitiva.

Bom. As trajetórias só existem compartilhadas por várias situações e, sem sombra de dúvidas, divididas com pessoas. Tomo esse tempo então para agradecer a todas, ou quase todas, que partilharam de alguma forma da minha jornada acadêmica no mestrado e que de alguma forma, tiraram barreiras que surgiram nesse caminho e pareciam muitas vezes, intransponíveis.

Agradeço aos meus colegas, tanto de graduação quanto de mestrado, que me auxiliaram com questionamentos de caráter pessoal, acadêmico e profissional e através de muitas trocas, auxiliaram a me tornar quem eu sou.

Aos professores que passaram em minha trajetória acadêmica, agradeço a paciência, a dureza e sobretudo ao conhecimento compartilhado que mesmo quando não me encantava momentaneamente, me marcou e compôs a em sabedoria em constante construção que nutro com o exemplo de todos.

Aos meus amigos próximos, sejam eles conquistados na escola onde os ventos mais pareciam furacão, ou encontrados já na universidade, seja quando desisti para me encontrar ou quando me encontrei, mas para não desistir precisei lutar e dançar como um capoeirista ao som de um “paranauê”, ou até mesmo no trabalho, que na presença de vocês os desafios mais pareciam uma visita ao clube, desejo o meu sincero obrigado pelos momentos de riso e choro muito compartilhados.

Ao prof. Ulisses e a prof. Márcia, orientadores de graduação e mestrado, respectivamente, agradeço o compartilhamento de conhecimentos, no embate, na pausa ou na continuidade.

Por fim, mas não menos importante, um muitíssimo obrigado a minha família. Em especial, o meu pai e minha mãe não tenho palavras para agradecer o maior presente que me deram ao estimular constantemente a busca pela educação, mesmo quando lutava com todas as minhas forças contra; a minha irmã que me inspira todos os dias na sua luta por uma melhor educação; e a minha companheira de vida Dilian, que me

apoia em todos os percalços, que me acompanhou, estimulou e ajudou a terminar essa trajetória.

Então, quando volto a pergunta sobre as melhores trajetórias, o desvio da resposta faz mais sentido. O importante não está no final dela, mas sim no caminho percorrido.

RESUMO

O mundo está em constante transformação. Novas ideias, produtos e pesquisas surgem a cada momento. As pesquisas em desenvolvimento também vêm passando por mudanças. Menos recursos são empregados ano após ano nas pesquisas científicas no contexto recente nacional, tornando crucial seu melhor aproveitamento para a entrega contínua de valor para a sociedade. Sob essa ótica, o trabalho pretende entender quais são os fatores que levam pesquisas a se transformarem em produtos, além de como é o caminho de desenvolvimento da bancada até um licenciamento tecnológico ou a construção de uma empresa para comercialização do produto desenvolvido. Através da análise de dois estudos de caso da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) sob a perspectiva da Escala de Prontidão Tecnológica (TRL), esta dissertação propõe a existência de uma Escala de Prontidão de Recursos (EPR), onde os níveis de recursos precisam ser alcançados antes de alcançar um novo nível na TRL. Além disso, foi possível observar que os agentes que disponibilizam recursos e suas formas de avaliação estão diretamente relacionados à conquista de novos níveis dentro da Escala de Prontidão Tecnológica.

Palavras-chave: Escala de Prontidão Tecnológica; TRL; Escala de Prontidão de Recursos; Políticas de Inovação; Vale da Morte; Valor social.

ABSTRACT

The World is constantly changing. New ideas, products and emerge at every moment. Research in development has also been undergoing changes. Fewer resources are used year after year on Brazilian scientific research, making their best use crucial for the continuous delivery of value to society. From this perspective, this work aims to understand which factors leads research to become products and what are the paths that leads laboratory research through a technology transfer or the development of an enterprise to sell the developed product. Through an analysis of two case studies from Minas Gerais Federal University (UFMG) from the perspective of the Technology Readiness Level (TRL) tool, the research proposes that a Resource Readiness Level (EPR from Portuguese), where resource levels need to be achieved before reaching a new level in TRL. Besides it was possible to observe that the agents that provide resources and their forms of evaluation are directly related to the achievement of new levels within the TRL.

Key-words: Technology Readiness Level; TRL; Resources Readiness Level; Innovation Policies; Valley of Death; Social Value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da Escala de Prontidão Tecnológica traduzida do original de Mankins.....	19
Figura 2: Índice de Prontidão Comercial (CRI).....	25
Figura 3: Vale da Morte (1991).....	29
Figura 4: Quantidade de Recursos e TRL.....	30
Figura 5: Recursos por atores e TRL.....	30
Figura 6: Análise de instrumentos de apoio à inovação do governo federal na escala de prontidão tecnológica.....	34
Figura 7: Caminho geral do desenvolvimento tecnológico na TRL e na EPR para uma pesquisa.....	39
Figura 8: Dificuldade de Desenvolvimento de Projeto na NASA.....	40
Figura 9: Probabilidade de sucesso X expectativa de retorno X expectativa de custo.....	41
Figura 10: Método de estudo de caso.....	44
Figura 11: Esquema da metodologia utilizada.....	45
Figura 12: TRL Caso nanoscópio.....	55
Figura 13: TRL e EPR para o nanoscópio.....	57
Figura 14: TRL Caso Produto de Tratamento de água.....	65
Figura 15: TRL e EPR para o produto de tratamento de água.....	67
Figura 16: Valor social e financeiro percebido pelos agentes financiadores.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Níveis de Prontidão (1989).....	18
Quadro 2: TRL na ABNT	20
Quadro 3: TRL e Descrição geral para produtos.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD² – *Advancement Degree of Difficulty*

Adten – Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Empresa Nacional

ARL – *Acceptance Readiness Level*

BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BRL – *Balanced Readiness Level*

CRI – *Commercial Readiness Index*

DoD – *Department of Defense*

DRL – *Demand Readiness Level*

EMBRAPII – Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial

ENBT – Empresa nascente de base tecnológica

EPR – Escala de Prontidão de Recursos

EUA – Estados Unidos da América

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

FOM – *Figure of merit*

GAO – *Government Accountability Office*

ICT – Instituição de Ciência e Tecnologia

IRL – *Innovation Readiness Level*

IU – *Innovation Use*

MaRL – *Manufacturing Readiness Level*

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MRL – *Market Readiness Level*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

PADIQ – Plano de Desenvolvimento e Inovação da Indústria Química

PD&I – Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

R&D³ – *Research and Development Degree of Difficulty*

RAD2 – *Relative Advancement Degree of Difficulty*

RRL – *Regulatory Readiness Level*

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

STRL – *Software Technology Readiness Level*

TERS – *Tip-enhanced Raman spectroscopy*

TNV – *Technology Need Value*

TRA – *Technology Readiness Assessments*

TRRA – *Technology Readiness and Risk Assessment*

TRL – *Technology Readiness Levels*

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	ESCALA DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA	17
2.1.	História e Conceitos da TRL	17
2.2.	Evoluções e adaptações da TRL:	22
2.3.	Críticas na literatura à Escala de Prontidão Tecnológica:.....	26
3.	INOVAÇÃO E A ESCALA DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA	28
3.1.	TRL e o Vale da Morte.....	28
3.2.	Políticas de Inovação e o uso da TRL	31
3.3.	Políticas nacionais de Inovação e a TRL.....	32
4.	METODOLOGIA.....	36
4.1.	Definição.....	36
4.2.	Problema	37
4.3.	Hipóteses.....	42
4.4.	Estudo de caso	43
4.5.	Protocolo de coletas	46
5.	ESTUDOS DE CASO	47
5.1.	Nanoscópio óptico de alta resolução	47
5.2.	Análise: Nanoscópio	55
5.2.1.	Trajetória da maturidade tecnológica na TRL do nanoscópio:.....	55
5.2.2.	Escala de Prontidão de Recursos e TRL para o nanoscópio:.....	57
5.3.	Produto para tratamento de água em comunidades locais.....	59
5.4.	Análise: Produto de tratamento de água.....	65
6.	DISCUSSÃO FINAL	70
6.1.	Primeira Hipótese	70
6.2.	Segunda Hipótese	71
6.3.	Percepções gerais	73
6.4.	Novas discussões.....	75
7.	CONCLUSÃO.....	79
	REFERENCIAL TEÓRICO.....	82

1. INTRODUÇÃO

Após a crise de saúde e sanitária que se instaurou no mundo no final da década de 2020, as pesquisas científicas conquistaram a atenção da mídia e do senso comum no mundo. No Brasil, apesar dessa atenção, o movimento de esvaziamento educacional e científico promovido pelo governo de 2018 a 2022 (SILVA et al., 2022) vai na contramão da importância histórica dessa atividade para o desenvolvimento humano e da sociedade (PSACHAROPOULOS; WOODHALL, 1993).

Cada vez são mais frequentes cortes nas verbas públicas na educação e ciência nacional, tornando a situação de pesquisa e ensino nacionais cada vez mais precária (SILVA et al., 2022). Nesse contexto, torna-se urgente para a sobrevivência dessa atividade e a proposição de alternativas para contornar a situação. O assunto, no entanto, não é trivial e exige não somente um esforço teórico para a compreensão do contexto de diminuição de investimentos dentro do sistema de pesquisa como também um próprio esforço dos agentes envolvidos nessa atividade de se reinventarem, pensando e agindo de maneira diferente do que agem historicamente (LIMA et al., 2019).

Um dos esforços de alternativas para a pesquisa nacional está atrelado a compreensão de como as pesquisas avançam em maturidade tecnológica (LIMA et al., 2019). Entretanto, apesar de encontrarmos alguns estudos de caso sobre produtos e empresas de base tecnológica na literatura (ARAÚJO, 2022; ZANANDREZ, 2020; LAURIANO, 2020), pouco esforço foi empregado na compreensão do avanço desde fases menos maduras de desenvolvimento da pesquisa até se tornar um produto aplicado na sociedade.

Logo, essa dissertação pretende agregar à discussão de desenvolvimento de pesquisas e seu avanço na maturidade tecnológica. Para a compreensão de maturidade tecnológica, apesar de não existir um consenso sobre a melhor metodologia, a opção que mais vem sendo utilizada no meio acadêmico (QUINTELLA, 2017) e que também vem sendo adotado por políticas de inovação nacionais (MARTIN et al., 2019) é a Escala de Prontidão Tecnológica (do inglês, *Technology Readiness Level* – TRL).

A TRL pode ser definida como uma escala linear de 9 níveis, sendo 1 o nível inicial de desenvolvimento tecnológico da escala e 9 o nível final de desenvolvimento

tecnológico, que consegue avaliar através do conceito de figura de mérito o quão madura é a tecnologia avaliada naquele presente momento (MANKINS, 2009b; HEDER, 2017; OLIVIERI, 2014).

Com isso, dois estudos de casos de pesquisas da UFMG que avançaram em maturidade de desenvolvimento tecnológico ao longo de um período foram analisados com o intuito de entender fatores que auxiliaram no avanço tecnológico, além de dificuldades e desafios durante a trajetória. Na literatura, um dos principais pontos de deficiência da TRL está atrelado a dificuldade de identificação dos recursos necessários para se alcançar novos desenvolvimentos tecnológicos (MANKINS, 2009; BAKKE, 2017; OLECHOWSKI *et al.*, 2020). Portanto, a dissertação traz o objetivo de identificar quais os principais fatores que levaram os casos aos avanços de maturidade tecnológica e como a disponibilidade e prontidão de recursos afetaram esse processo.

O trabalho está dividido em uma primeira parte na qual são descritos as referências bibliográficas e o Estado da Arte com relação a TRL, tanto do ponto de vista de conceito e contexto de criação da Escala e de desenvolvimento dela, quanto nas suas evoluções, adaptações, dificuldades e desafios.

Em seguida, é apresentado ao leitor uma contextualização de como a Escala de Prontidão Tecnológica está sendo utilizada nos contextos das políticas de inovação no mundo e no Brasil, sobretudo a sua função enquanto critério de seleção para políticas públicas de subvenção econômica a pesquisas.

A próxima etapa do trabalho foi a de definição de uma metodologia para a análise dos casos apresentados, além de uma problematização que a conecte com a TRL enquanto objeto de estudo. Durante essa definição, é proposta uma Escala espelho à Escala de Prontidão Tecnológica que se relaciona aos níveis de recursos necessários aos avanços de maturidade de uma pesquisa.

Após a construção do problema, as duas hipóteses para análise dos casos foram definidas: 1) Alcançar um determinado nível de recursos é determinante para o avanço na maturidade de desenvolvimento tecnológico; e 2) O agente que libera o recurso e sua respectiva forma de avaliação é determinante para o recebimento dos recursos necessários e como consequência para o avanço da maturidade de desenvolvimento tecnológico. Sob essas questões os dois estudos de caso foram construídos.

O primeiro estudo de caso analisado foi o de um nanoscópio óptico de alta precisão inédito do mundo, a partir de pesquisas na área de instrumentação científica da área de física que teve o começo do seu desenvolvimento em 2003. Atualmente a pesquisa já possui uma primeira versão de produto pronto para ser comercializado por uma empresa composta por integrantes originais da pesquisa que gerou uma plataforma tecnológica.

O segundo estudo de caso se relaciona aos desastres ambientais que assolaram o Estado de Minas Gerais com os rompimentos da barragem da mineradora Samarco em 2015. A pesquisa se deu para construir um produto para tratamento de água dos efluentes que foram contaminados pelos rejeitos e prejudicaram as fontes de água de diversas comunidades ribeirinhas. A pesquisa, na área da química, encontra-se hoje com um protótipo em escala relevante pronto para testes nos rios contaminados, além de possuir recursos e plano de negócios para continuar se desenvolvendo e impactando positivamente a vida das comunidades alvo.

Após as análises dos casos, esta dissertação apresenta os aprendizados e os resultados da pesquisa em comparação com as hipóteses levantadas, além de novas questões a serem estudadas e trabalhadas futuramente.

2. ESCALA DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA

Uma das maneiras de mensurar o desenvolvimento e maturidade tecnológica de uma pesquisa ou produto é através da Escala de Prontidão Tecnológica. O capítulo a seguir pretende elucidar o contexto histórico em que surge a *Technology Readiness Level* (TRL) e a sua conceitualização.

Em seguida, explica-se as evoluções e alternativas à TRL que surgiram ao longo dos anos com as experiências de aplicação da escala em outros campos. Por fim, são demonstradas as críticas encontradas na literatura à ferramenta.

2.1. História e Conceitos da TRL

Em 1995, John Mankins, funcionário da *National Aeronautics and Space Administration* - NASA, publicou a ferramenta Escala de Prontidão Tecnológica, no inglês, *Technology Readiness Levels* (TRL) que vinha sendo usada pela agência desde o início da década de 70 para determinação do estágio das tecnologias que vinham sendo desenvolvidas internamente (MANKINS, 1995).

A ferramenta surgiu através da evolução dos conceitos de Revisão de Prontidão para Voo (do inglês, *Flight Readiness Review*), que já estava estabelecido na NASA em 1969 como prática para liberação de um equipamento a ser testado em decolagem, aliada à nova ideia de avaliação tecnológica que traz uma análise anterior ao equipamento se quer ser produzido e estar apto a uma revisão de prontidão de voo (MANKINS, 2009b). A ferramenta foi nomeada de Prontidão de Revisão Tecnológica (do inglês, *Technology Readiness Review*) e tinha o objetivo de entender se uma ideia de nova tecnologia que seria utilizada em missões espaciais deveria ser desenvolvida (HEDER, 2017).

A Prontidão de Revisão Tecnológica auxiliou no processo de aprovação da Base Espacial que a agência pretendia desenvolver e colocar em órbita em 1969. Apesar de não ter sido aprovada, a Prontidão de Revisão Tecnológica começou a ser difundida dentro da Agência. O presidente estadunidense Ronald Reagan, no final da década de 80, começou a direcionar a NASA e suas inovações a benefícios diretos e indiretos para a sociedade civil. Nesse contexto, o processo de desenvolvimento de novas tecnologias da agência passou a ser direcionado não somente à realização dos

programas espaciais, mas também para o desenvolvimento de tecnologias menores e complementares, separadas do programa. Entretanto, como essas tecnologias complementares não poderiam ser postas em prova de voo, outra forma de avaliação deveria ser adotada (HEDER, 2017).

Em 1989, pesquisadores da Agência lançaram o conceito de Níveis de Prontidão (do inglês, *Readiness Levels*) para substituir as categorias de estágio de desenvolvimento utilizadas à época (HEDER, 2017).

Os pesquisadores construíram uma escala de 7 níveis com uma breve descrição de cada um deles, como mostra o quadro 1 abaixo:

Quadro 1: Níveis de Prontidão (1989)

Níveis de Prontidão	Descrição geral dos níveis
1	Princípios básicos observados e reportados.
2	Aplicação potencial validada
3	Prova de conceitos das funções críticas demonstrada de forma analítica ou experimental.
4	Validação em ambiente de laboratório de componentes ou mesa de testes.
5	Validação em ambiente simulado ou real do espaço de componentes ou mesa de testes.
6	Adequação do sistema validada em um ambiente simulado.
7	Adequação do sistema validada no espaço.

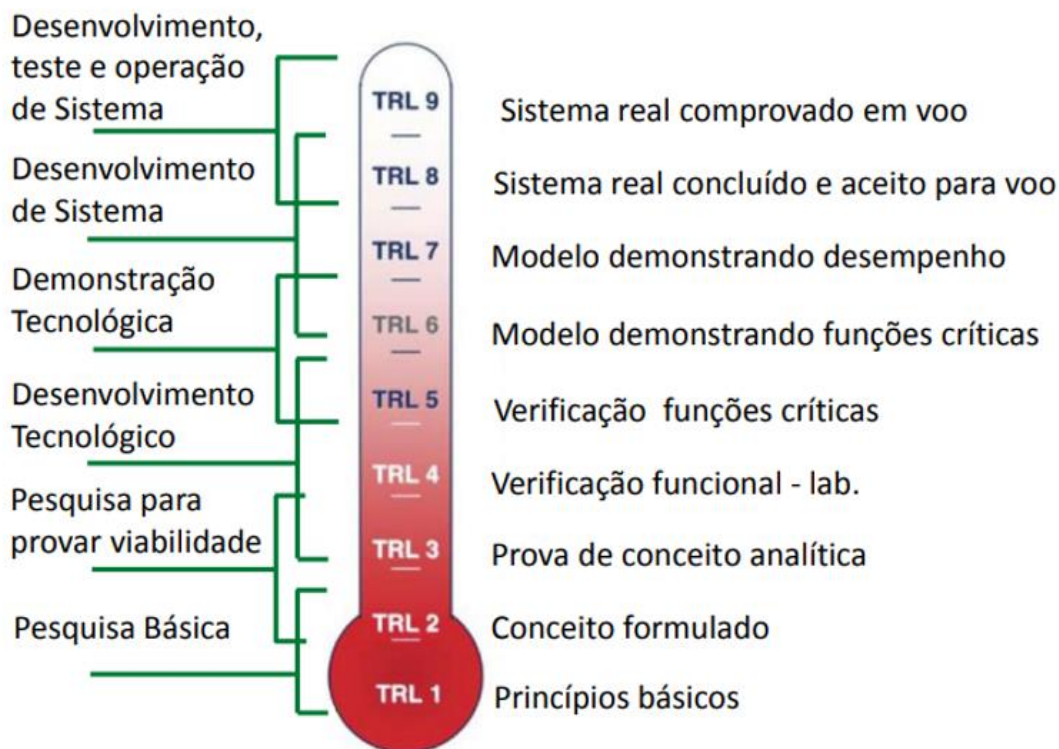
Fonte: Heder 2017

Em 1991, a NASA passou a adotar os Níveis de Prontidão em um dos seus planos e incorporou outros dois níveis à escala. Em 1995, John C. Mankins, publica esses níveis e os denomina de Escala de Prontidão Tecnológica (do inglês, *Technology Readiness Level*). A clássica figura 1 traz a ilustração da escala criada por Mankins, adaptada para a língua portuguesa pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)¹.

¹ Palestra do PROGRAMA PIPE/PAPPE SUBVENÇÃO no INPE. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/desafios_tecnologicos.pdf>. Acesso em: <19/09/2022>.

Figura 1: Ilustração da Escala de Prontidão Tecnológica traduzida do original de Mankins

TRL – *Technology Readiness Level*



Fonte: Mankins (2009) adaptado, apud Palestra sobre PROGRAMA PIPE/PAPPE SUBVENÇÃO no INPE (2016)

A TRL utiliza o que é chamado de figura de mérito, do inglês, *figure of merit* (FOM). Olivieri (2014) define FOM como uma “quantidade usada para caracterizar a performance de um aparelho, sistema, ou método relativamente às suas alternativas”. Nesse sentido, a TRL traz uma escala linear de 9 níveis, sendo 1 o nível inicial de desenvolvimento tecnológico da escala e 9 o nível final de desenvolvimento tecnológico, que consegue avaliar através do conceito de figura de mérito o quão madura é a tecnologia naquele presente momento.

A aplicação da TRL nos Estados Unidos da América (EUA) não se limitou apenas à NASA. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos, do inglês, *Department of Defense* (DoD) passou a adotar a escala em 1999, também para a aquisição de novas tecnologias em armamentos e o mesmo foi acontecendo ao longo dos anos com países anglófonos e seus respectivos departamentos de defesa (HEDER, 2017).

Na Europa, a escala de prontidão tecnológica surge no contexto da agência espacial europeia no meio dos anos 2000, o que desencadeou o seu primeiro uso no programa

de trabalho da comissão europeia no contexto de seus programas espaciais, já em 2010 (HEDER, 2017). Em 2013, a escala teve sua influência aprofundada com a criação da ISO 16290:2013 trazendo uma formalidade para as definições de TRL e os critérios para definir cada um dos níveis.

No Brasil, a ABNT NBR ISO 16290: 2015² tem o mesmo papel da ISO europeia e traz as definições usuais da TRL para o português, mas também o marco alcançado para atingir o nível e o trabalho que precisam ser documentados e realizados em cada um deles (MARTIN et al, 2019). O quadro 2 a seguir mostra quais são as descrições de cada nível:

Quadro 2: TRL na ABNT

NÍVEL DE MATURIDADE DA TECNOLOGIA	MARCO ALCANÇADO PELO ELEMENTO	TRABALHO REALIZADO (DOCUMENTADO)
TRL 1: Princípios de base observados e relatados	Aplicações potenciais são identificadas após observações de base, mas o conceito do elemento ainda não está formulado.	Expressão dos princípios de base previstos para uso. Identificação de potenciais aplicações.
TRL 2: Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados	Formulação de potenciais aplicações e conceito preliminar do elemento. Nenhuma prova de conceito ainda.	Formulação de aplicações em potencial. Projeto conceitual preliminar do elemento, fornecendo entendimento de como os princípios básicos podem ser usados.
TRL 3: Prova de conceito analítica e experimental da função crítica e/ou da característica	O conceito do elemento é elaborado e o desempenho esperado é demonstrado por meio de modelos analíticos suportados por dados experimentais/características.	Requisitos de desempenho preliminares (podem objetivar diversas missões), incluindo definição de requisitos de desempenho funcionais. Projeto conceitual do elemento. Entrada de dados experimentais, definição e resultados de experimentos laboratoriais. Modelos analíticos do elemento para a prova de conceito.
TRL 4: Verificação funcional em ambiente laboratorial do componente e/ou maquete	O desempenho funcional do elemento é demonstrado por ensaios com maquete em ambiente laboratorial.	Requisitos de desempenho preliminares (podem objetivar várias missões) com definição de requisitos de desempenho funcionais. Projeto conceitual do elemento. Plano de ensaios de desempenho funcional. Definição da maquete para verificação de desempenho funcional. Relatórios de ensaios com a maquete.

² Resumo da ISO 16290:2013 em língua inglesa. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16290:ed-1:v1:en>>. Acesso em: <19/09/2022>.

NÍVEL DE MATURIDADE DA TECNOLOGIA	MARCO ALCANÇADO PELO ELEMENTO	TRABALHO REALIZADO (DOCUMENTADO)
TRL 5: Verificação em ambiente relevante da função crítica do componente e/ou maquete	As funções críticas do elemento são identificadas e o ambiente relevante associado é definido. Maquetes, não necessariamente em escala real, são construídas para verificar o desempenho por meio de ensaios em ambiente relevante, sujeitos a efeitos de escala.	Definição preliminar dos requisitos de desempenho e do ambiente relevante. Identificação e análise das funções críticas do elemento. Projeto preliminar do elemento, sustentado por modelos apropriados para a verificação das funções críticas. Plano de ensaios das funções críticas. Análise de efeitos de escala. Definição da maquete para a verificação da função crítica. Relatórios de ensaios com a maquete.
TRL 6: Modelo demonstrando as funções críticas do elemento em um ambiente relevante	As funções críticas do elemento são verificadas e o desempenho é demonstrado em ambiente relevante com modelos representativos em formato, configuração e função.	Definição de requisitos de desempenho e do ambiente relevante. Identificação e análise das funções críticas do elemento. Projeto do elemento, sustentado por modelos apropriados para a verificação das funções críticas. Plano de ensaios da função crítica. Definição do modelo para as verificações das funções críticas. Relatórios dos ensaios com o modelo.
TRL 7: Modelo demonstrando o desempenho do elemento para o ambiente operacional	O desempenho é demonstrado para o ambiente operacional no solo ou, se necessário, no espaço. Um modelo representativo, refletindo totalmente todos os aspectos do projeto do modelo de voo, é construído e ensaiado com margens de segurança adequadas para demonstrar o desempenho em ambiente operacional.	Definição de requisitos de desempenho, incluindo definição do ambiente operacional. Definição e realização do modelo. Plano de ensaios do modelo. Resultados de ensaios com o modelo.
TRL 8: Sistema real completo e aceito para voo ("qualificado para voo")	O modelo de voo é qualificado e integrado ao sistema final pronto para voo.	Modelo de voo é construído e integrado no sistema final. Aceitação para voo do sistema final.
TRL 9: Sistema real "demonstrado em voo" por meio de operações em missão bem-sucedida	A tecnologia está madura. O elemento está em serviço com sucesso, para a missão designada, no ambiente operacional real.	Comissionamento em fase inicial de operação. Relatório de operação em órbita.

Fonte: Martin et al (2019)

2.2. Evoluções e adaptações da TRL:

As discussões com relação à TRL se adensam ao longo dos anos de sua utilização. Mankins (2009b) acrescenta à discussão dois novos aspectos. O primeiro seria o da necessidade constante de avaliação e, conseqüentemente, de determinação da TRL da tecnologia que está sendo desenvolvida. Ele chama os pontos de avaliação da TRL de avaliação de prontidão tecnológica, no inglês, *Technology Readiness Assessments* (TRA). Esses pontos de avaliação deveriam existir ao longo da etapa de desenvolvimento da tecnologia para auxiliar as tomadas de decisão com relação à evolução tecnológica baseada na identificação da realidade atual da tecnologia. (MANKINS, 2009b)

O segundo ponto traz consigo a ampliação da discussão sobre a escala de prontidão tecnológica para além de uma avaliação da tecnologia. Mankins (2009b) trouxe que para alcançar níveis maiores de TRL, as tecnologias dentro da NASA deveriam passar por uma análise de risco para alcançarem uma nova etapa de desenvolvimento e maturidade na TRL.

Nesse contexto, Mankins (2009a) estabelece a avaliação de risco e prontidão tecnológica, no inglês, *Technology Readiness and Risk Assessment* (TRRA) trazendo mais uma dimensão para a análise do desenvolvimento tecnológico. Para a análise de risco, Mankins (2009a) introduz duas novas ferramentas. Para mensurar a dificuldade esperada para a maturação da tecnologia e alcançar novos níveis na TRL, foi proposta a medida de Grau de Dificuldade de Pesquisa e Desenvolvimento, no inglês, *Research and Development Degree of Difficulty* (R&D³), determinando cinco níveis de dificuldade.

O primeiro nível é o de “dificuldade muito baixa antecipada” para alcançar o próximo estágio da TRL, caminhando em avaliações qualitativas de dificuldade até chegar no quinto nível de “dificuldade muito alta antecipada” para alcançar o próximo nível da TRL. As probabilidades de sucesso vão de 99% para o nível I, depois 90%, 80%, 50% e 20% para as probabilidades de sucesso dos níveis subsequentes (MANKINS, 1998).

Para mensurar a necessidade daquela tecnologia para o sucesso da empresa, foi proposto um fator de ponderação denominado de Valor da Necessidade da

Tecnologia, no inglês, *Technology Need Value* (TNV), também determinando cinco escalas para o peso.

A TNV usa duas características de avaliação em cada uma de suas escalas. A relação subjetiva de importância e impacto da tecnologia para a empresa e o potencial de fornecer informações importantes para o desenvolvimento da empresa e de novas tecnologias. No primeiro nível da escala da TNV, o esforço tecnológico não é crítico para o sucesso do programa (espacial da empresa), sendo o sucesso majoritariamente definido por questões de eficiência financeira, e as informações geradas da evolução do desenvolvimento são úteis para o longo prazo. No outro extremo, no quinto nível, o esforço tecnológico é extremamente crítico para o sucesso do programa e as informações geradas são essenciais para as decisões gerenciais de curto prazo da empresa. Os pesos vão de 40% na primeira escala, seguindo de 60%, 80%, 100% e 120% na última e quinta escala da TNV (MANKINS, 2009a).

O R&D³ trouxe uma capacidade de avaliar a probabilidade de sucesso das atividades de desenvolvimento tecnológico, que são habilidades da própria natureza do trabalho usual de um pesquisador. Já com a TNV, a ponderação da necessidade da tecnologia levanta questões de habilidades não habituais à pesquisa, como as questões financeiras de custo do projeto e gerenciamento de recursos da empresa. Essas dimensões não relacionadas às habilidades da natureza da Pesquisa & Desenvolvimento também foram exploradas por outros atores em abordagens complementares à TRL. A percepção de que o sucesso de um desenvolvimento tecnológico não seria linear e que não possui apenas características técnicas e tecnológicas que podem ser determinadas através de análises materiais dos aspecto técnico-desenvolvimentista expandiu-se na academia (DENT e PETIT, 2011; HASENAUER et al, 2016; SARTAS et al, 2020).

O Departamento de Defesa Estadunidense adaptou a TRL para processos ao perceber que a especificidade da indústria aeroespacial limitava a percepção da maturidade tecnológica na escala. O DoD cria, então, uma escala que caminha lado a lado a escala de prontidão tecnológica, com níveis correlatos, de 1 a 9 para a maturidade do processo de produção da tecnologia, mas acrescentando um nível 10 de maturidade de processo. A escala foi chamada de Escala de Prontidão Industrial,

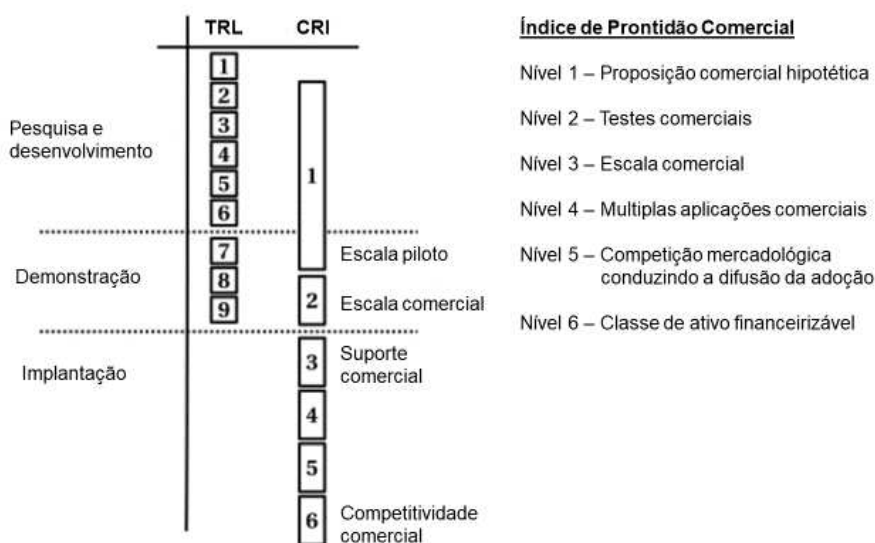
do inglês *Manufacturing Readiness Level*³. Além da *Manufacturing Readiness Level* (MaRL), o Departamento também passou a utilizar a Escala de Prontidão de Software, do inglês *Software Technology Readiness Level* (STRL), para determinar o nível de maturidade de aplicações no processo de aquisição e desenvolvimento de novos softwares (NAGLE, 2016).

A Escala de Prontidão Mercadológica, no inglês, *Market Readiness Level* (MRL) é outra escala originada da TRL. Para essa, o avaliado é o quão adaptada e adepta a tecnologia está considerando o mercado que está inserida (VIK et al, 2021). Porém, a MRL foi percebida de maneiras ligeiramente diferentes dependendo do autor. Paun (2011) chama de Escala de Prontidão de Demanda, no inglês, *Demand Readiness Level* (DRL) uma avaliação que possui a mesma conotação mercadológica e objetiva uma demonstração de forças mercadológicas que impactam no desenvolvimento tecnológico. Entretanto, a pesquisa traz a importante visão sobre os processos de desenvolvimento tecnológico puxados pela demanda e os processos que são puxados pelo próprio desenvolvimento científico. Em outra ponta, Kobos *et al.* (2018) traz uma visão de MRL preocupada com a adoção mercadológica das tecnologias após a conclusão do desenvolvimento tecnológico, trazendo uma progressão linear entre a caminhada dentro do TRL até chegar no MRL. Muradovich (2017), por sua vez, traz a adoção mercadológica concomitante ao desenvolvimento tecnológico, mas começando após um nível maior de desenvolvimento.

Outra ideia ligada a Escala de Prontidão Mercadológica foi criada na Austrália com o nome *Commercial Readiness Index* (CRI). O Índice de Prontidão Comercial foi criado no contexto do mercado de energia renovável, com aplicabilidade em outras áreas, para solucionar o risco que ainda existe após o alcance do nível 9 na TRL (HEDER, 2017). Eles foram divididos em seis níveis e se posicionam da seguinte maneira, em comparação com a escala de prontidão tecnológica, conforme demonstrado na figura 2:

³ *Manufacturing Readiness Level* (MaRL) Deskbook do programa de processo de produção tecnológica do Departamento de Defesa dos EUA. disponível em: <http://www.dodmrl.com/MRL_Deskbook_V2_21.pdf>. Acesso em: <26/09/2022>.

Figura 2: Índice de Prontidão Comercial (CRI)



Fonte: Elaboração do autor adaptado de Heder (2017)

A relevância da legalização do produto através da aprovação dos agentes da sociedade cabíveis ganhou destaque na Escala de Prontidão Regulatória, no inglês, *Regulatory Readiness Level* (RRL) (KOBOS *et al.*, 2018; VIK *et al.*, 2021). De maneira análoga, a legitimação pela sociedade depende de uma aprovação formal de agentes da mesma na Escala de Prontidão de Aceitação, no inglês, *Acceptance Readiness Level* (ARL) (VIK *et al.*, 2021).

Na literatura encontram-se, ainda, estudos que aglutinam os conceitos multidimensionais exemplificados aqui. Esse fenômeno pode ser observado através da Escala Balanceada de Prontidão, no inglês, *Balanced Readiness Level* (BRL), que traz em conjunto a percepção de TRL, MRL, ARL, RRL (VIK *et al.*, 2021) e a Escala de Uso da Inovação, no inglês, *Innovation Use* (IU), que traz uma escala evolutiva da progressão da aplicação da tecnologia com os atores que não estavam envolvidos diretamente com o desenvolvimento tecnológico (SARTAS *et al.*, 2020).

Abordagens que transformaram e adaptaram a tradicional TRL em outras escalas também surgiram. A Escala de Prontidão da Inovação, no inglês, *Innovation Readiness Level* (IRL) trouxe um conceito ampliado de tecnologia para além da área aeroespacial que originou a ferramenta inicial. O conceito traz uma escala para mensurar inovações tecnológicas e não tecnológicas em todos os tipos de inovação (SARTAS *et al.*, 2020).

2.3. Críticas na literatura à Escala de Prontidão Tecnológica:

Apesar da difusão do conhecimento sobre a TRL e suas evoluções, as críticas às aplicações da escala começaram a surgir, como é o caso de uma experiência específica com empresas nascentes de base tecnológica (ENBT) em Viena, onde a forma de avaliação da evolução das ENBT durante o processo de incubação incorporou a TRL e MRL com algumas alterações (HASENAUER *et al.*, 2016)⁴.

Ao observar-se a quantidade de adaptações da TRL que surgiram ao longo do tempo, a inferência natural é a de que a Escala de Prontidão Tecnológica, no mínimo, não deve ser utilizada como uma ferramenta universal para a avaliação da maturidade tecnológica de uma tecnologia. Além, o número de complementos de análise de figura de mérito para questões que ultrapassam a percepção tecnológica também demonstra que para a evolução da maturidade tecnológica outros fatores, que não somente tecnológicos, influenciam o processo. O trabalho de Olechowski *et al.* (2020) sintetiza os principais desafios da implementação da TRL nos seguintes a seguir relatados.

O primeiro desafio para a TRL seria a complexidade dos sistemas que as pesquisas e tecnologias podem estar inseridas. Nessa ótica, a não preocupação com integração e conectividade com outras pesquisas e tecnologias no contexto; a maturidade da interface da tecnologia com o usuário; a influência de novos componentes ou ambientes; e a prontidão do sistema como um todo e não apenas na tecnologia são aspectos que geram dificuldades na implementação cotidiana das pesquisas. Para além, existe a preocupação com relação ao escopo da determinação do nível de maturidade da tecnologia na escala não conseguir ser assertivo para cada nível, a preocupação com a priorização de desenvolvimento tecnológico que pode esconder riscos maiores para uma implementação tecnológica, além da dificuldade de uma representação visual que consiga trazer informações valiosas para o processo de desenvolvimento tecnológico (OLECHOWSKI *et al.*, 2020).

O segundo desafio se relaciona ao planejamento e revisão da implementação da Escala de Prontidão Tecnológica. A confiança de que se conseguirá um progresso de maturidade baseada em testes e obstáculos claros não é abordada na escala. Além

⁴ Esse estudo ainda trouxe uma contribuição de avaliação matricial – também observada em Startas *et al.* (2020), deixando claro visualmente que a proximidade de alcançar estágios de desenvolvimento a ENBT dependia tanto do seu desenvolvimento tecnológico de produto/serviço quanto da sua usabilidade mercadológica e social.

disso, o esforço necessário, ou seja, os recursos que precisam ser usados para o avanço da maturidade tecnológica e o progresso na escala de prontidão tecnológica não estão presentes na TRL. Da mesma forma, a TRL não contempla níveis de desenvolvimento do sistema, a necessidade de complementação tanto de recursos como o desenvolvimento em um nível de maturidade se algo não sair como inicialmente planejado, assim como não contempla planos de contingência e planejamentos temporais de desenvolvimento (OLECHOWSKI *et al.*, 2020).

O último desafio identificado se relaciona à validade da avaliação do nível de maturidade dentro da escala. A imprecisão da escala e a subjetividade da avaliação geram dificuldades claras na implementação da TRL (OLECHOWSKI *et al.*, 2020).

3. INOVAÇÃO E A ESCALA DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA

Após entender as características, conceitos e contextos do surgimento da TRL até os dias atuais, é importante realizar uma nova contextualização da Escala como uma ferramenta da inovação. Para isso, a compreensão de que a TRL tem se tornado peça fundamental na liberação de recursos de subvenção e das políticas de inovação é crucial para o entendimento do seu impacto.

No capítulo que segue, encontra-se uma explicação sobre a relação entre a Escala de Prontidão Tecnológica e o conceito de vale da morte, além de como a TRL vem sendo incorporada nas Políticas de Inovação de Estados Unidos, integrantes da União Europeia e no Brasil.

3.1. TRL e o Vale da Morte

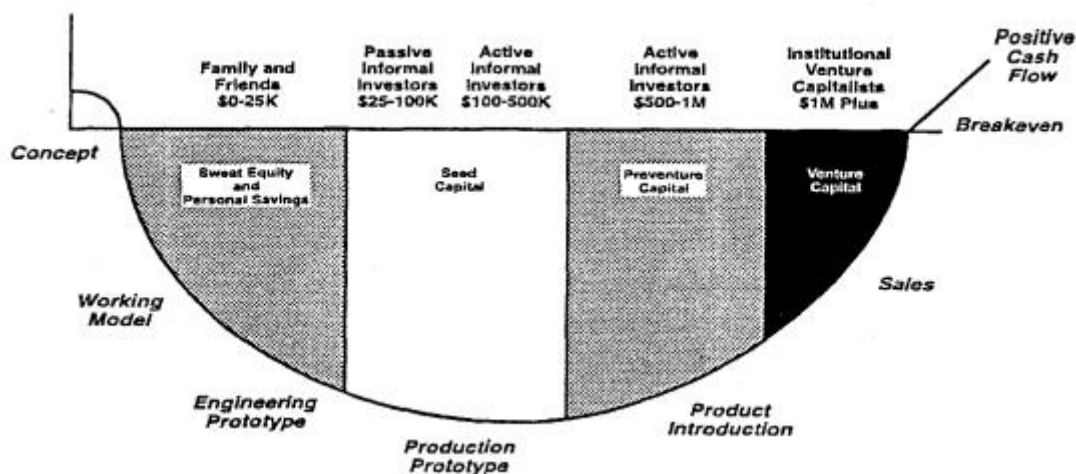
Um dos aspectos apontados na literatura como deficiência da escala de prontidão tecnológica é que não é possível identificar a quantidade de recursos necessários para alcançar os níveis de desenvolvimento tecnológico (MANKINS, 2009; BAKKE, 2017; OLECHOWSKI *et al.*, 2020).

Para compreender por que a falta de identificação de recursos na TRL é um aspecto negativo, faz-se necessário a compreensão do conceito comumente conhecido como “vale da morte”. Vale da Morte se refere à:

“Uma situação em que uma tecnologia não consegue alcançar o mercado graças a inabilidade de avançar nas fases de desenvolvimento até a sua fase de comercialização. Nessa situação, o vale da morte ocorre quando o desenvolvedor de uma tecnologia em particular conseguiu efetivamente demonstrar a eficácia da tecnologia mas não consegue obter recursos financeiros para escalonamento e manufatura.” (FRANK *et al.*, 1996, página 1)

Uma das primeiras demonstrações visuais do vale da morte é vista no livro “*From invention to innovation*” do Departamento de Energia dos EUA em 1991, conforme ilustrado na Figura 3:

Figura 3: Vale da Morte (1991)



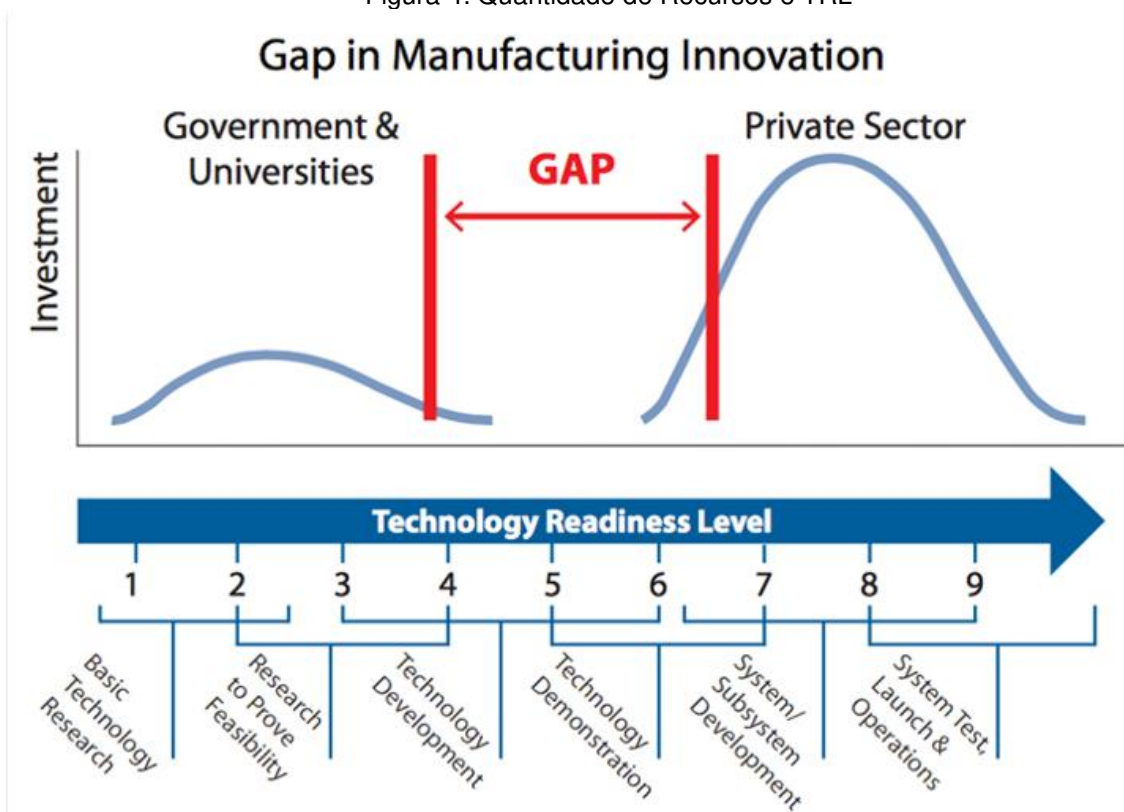
Fonte: U.S. DOE, 1991 apud FRANK et al., 1996

A Figura 3 demonstra uma curva de fluxo de caixa ao longo do tempo de uma pesquisa. A característica notória é que até a pesquisa alcançar o ponto de *breakeven*,⁵ ela necessariamente precisa consumir muito recurso financeiro até conseguir um estágio comercial onde as vendas possam equilibrar as contas e, porventura, pagar o investimento financeiro realizado nas atividades de pesquisa.

As representações visuais tradicionais do vale da morte trazem usualmente uma visão de recursos financeiros direcionada ao investimento privado, como pode ser visto na Figura 3. Alguns autores, no entanto, já trazem a perspectiva de investimento público, inclusive com o direcionamento para a escala de prontidão tecnológica, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5.:

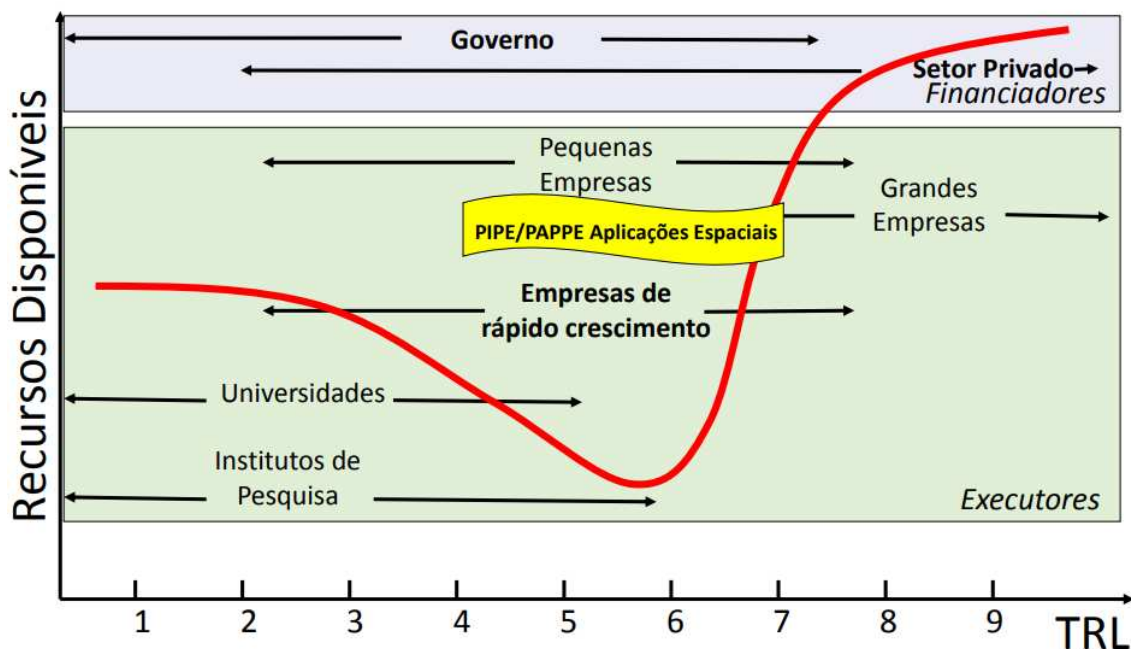
⁵ Breakeven é um termo financeiro que indica o momento no tempo ao longo do demonstrativo de fluxo de caixa de uma empresa que a quantidade de recursos financeiros que entram e saem se igualam a 0.

Figura 4: Quantidade de Recursos e TRL



Fonte: Wince-Smith (2017)

Figura 5: Recursos por atores e TRL

Fonte: Apresentação explicativa do Programa de subvenção PIPE/PAPPe para aplicações espaciais (2016)⁶⁶ Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/desafios_tecnologicos.pdf>. Acesso em: <01/10/2022>.

Nas representações demonstradas nas Figuras 4 e 5, percebe-se que entre os níveis 4 e 5 da TRL é que se encontra o vale da morte das pesquisas e tecnologias. Nesses níveis a pesquisa está em processo de validação e demonstração.

Com isso, é importante atrelar políticas públicas que consigam auxiliar as pesquisas a ultrapassarem tal barreira, que precisam de recursos para conseguirem ultrapassar esse obstáculo posto, que é o tema da próxima seção.

3.2. Políticas de Inovação e o uso da TRL

Desde sua concepção, a Escala de Prontidão Tecnológica tem relação intrínseca com as políticas de inovação. Na NASA, a escala se atrelava à comunicação com agentes fora da instituição, como o governo e potenciais compradores militares, por exemplo, sobre as tecnologias que estavam desenvolvendo. Além disso, era mais utilizada dentro do processo de minimização de riscos das novas missões espaciais, que se conectavam diretamente com a política de inovação da própria instituição (HEDER, 2017).

Não demorou muito para que o governo dos Estados Unidos da América adotasse a TRL como padrão em outros órgãos. Em 1999, o Departamento de Defesa planejava aumentar o financiamento de desenvolvimento de novas armas em 40% até o ano de 2001 e, para aprovação da política desse investimento, eles precisariam de uma reforma no gerenciamento desse financiamento. O senado estadunidense, então, solicitou ao escritório de advocacia geral dos EUA, do inglês, *Government Accountability Office* (GAO) para investigar o gerenciamento de financiamentos no departamento de defesa. Com isso, o GAO sugeriu que o Departamento de Defesa começasse a utilizar a TRL como forma de gerenciamento de risco de aquisições de tecnologias e que não adquirisse tecnologias que estivessem abaixo do nível 7 da escala (HEDER, 2017).

Na Europa, a adoção da TRL pela agência espacial foi puxada pela Comissão Europeia e desencadeou um processo que transformou a escala em uma ferramenta de política pública para o desenvolvimento de tecnologias habilitantes dentro da União Europeia em 2009 (HEDER, 2017). O direcionamento para as tecnologias habilitantes nasce da visão de que essas são as tecnologias que ao surgirem conseguem gerar

grandes aumentos de produtividade e propiciam o desenvolvimento de novos tipos de produtos e serviços (ASCHHOFF *et al.*, 2010). Para a UE, as tecnologias habilitantes seriam nanotecnologia, materiais avançados, biotecnologia, microeletrônicos e nanoeletrônicos, incluindo semicondutores e fotônica. Posteriormente a lista foi complementada com as tecnologias do setor de comunicações (HEDER, 2017).

O ponto para a escala de prontidão tecnológica na União Europeia é que as áreas de tecnologias habilitantes já usavam a TRL em seus processos de PD&I. Com isso, a Comissão Europeia não só recomenda explicitamente a utilização da escala nas pesquisas tecnológicas na região, como redefinia a caracterização dos nove níveis da escala original e determina os níveis da Escala de Prontidão Tecnológica que as tecnologias deveriam estar para participarem de programas. Um exemplo claro seria o do programa *Fast track to innovation* que determinava que as tecnologias para serem contempladas deveriam estar no nível 7 ou maior da TRL (HEDER, 2017).

3.3. Políticas nacionais de Inovação e a TRL

No Brasil, a adoção da escala de prontidão tecnológica, além de ter uma norma técnica focada na indústria espacial, possuem as Unidades EMBRAPII, que são pioneiras na utilização da escala para a determinação de projetos que serão apoiados (MARTIN *et al.*, 2019).

As Unidades EMBRAPII fazem parte de uma das estratégias da Associação de Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial para contribuir com o desenvolvimento da inovação na indústria brasileira⁷. As unidades credenciadas possuem um manual de operações para execução do programa e consequentes recebimentos de recursos subvencionados governamentais.

No Manual de Operações do Programa, as unidades devem se atentar que “os resultados dos projetos Embrapii devem necessariamente estar classificados entre 3 e 6 na escala de TRL (...)” (EMBRAPII, 2020). O Manual vai ainda mais longe ao identificar as dificuldades já descritas no trabalho da escala a ser aplicada em outras áreas de conhecimento e expõe tabelas de avaliação dos níveis de maturidade

⁷ Endereço eletrônico oficial da EMBRAPII. Disponível em: <<https://embrapii.org.br/institucional/quem-somos/>>. Acesso em: <21/01/2023>

tecnológica específicas para processos industriais (*Manufacturing Readiness Level - MaRL*), para softwares (*Software Technology Readiness Levels - STRL*) e para o desenvolvimento de fármacos e biofármacos de desenvolvimento próprio (EMBRAPII, 2020).

Além das Unidades EMBRAPII, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), na gestão do ministro Marcos Pontes, utilizava a TRL como métrica para pautar e direcionar as pastas do ministério (MARTIN *et al.*, 2019).

O MCTI⁸ ainda publicou a portaria nº 6.449, de 17 de outubro de 2022 determinando o uso de um sistema de medição e identificação de maturidade tecnológica dos projetos desenvolvidos no âmbito do ministério⁹. Com a portaria, o órgão determina que todos os projetos que passaram pelo Ministério, recebendo recursos e sendo avaliados pelo mesmo, deverão ter o seu Nível de Maturidade Tecnológica auferido, no mínimo, semestralmente por uma calculadora de maturidade tecnológica, que será disponibilizada 90 dias depois da publicação da portaria.

Apesar de não realizar nenhuma referência direta à TRL, é nítido que a portaria e a futura calculadora se inspiram na ferramenta popularizada por Mankins. No Art. 4º da portaria, lê-se:

“Art. 4º O uso do Sistema de Medição e Identificação do Nível de Maturidade Tecnológica tem como objetivos:

I - avaliar a maturidade tecnológica dos projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e de suas unidades vinculadas, permitindo assim diferenciais estratégicos na avaliação, na execução de ações e alocação de recursos;

II - aumentar a capacidade institucional das unidades vinculadas na captação de recursos financeiros não orçamentários por meio da classificação dos projetos segundo suas características e natureza de apoio mais adequado;

III - auxiliar no acompanhamento da evolução da maturidade dos projetos de PD&I do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e de suas unidades vinculadas;

IV - facilitar a modelagem de projetos orientados a mercado;

V - proporcionar critérios ágeis de identificação de oportunidades de investimento pelo setor privado.”

⁸ Durante o governo de 2018 a 2022, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação incorporou a pasta de comunicações. No governo seguinte o Ministério voltou a chamar-se Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) com a separação da pasta da comunicação. No trabalho, ambos são referidos como sinônimo.

⁹ Portaria MCTI nº 6.449, de 17 de outubro de 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: <25/10/2022>

Portaria MCTIC Nº 6.449, de 17 de outubro de 2022.

Até o dia de 21 de janeiro de 2023, o MCTI não havia publicado a Calculadora de Nível de Maturidade Tecnológica referida.

Martin *et al.* (2019) também realizaram um esforço para localizar alguns instrumentos de apoio à inovação do governo federal dentro da escala de prontidão tecnológica, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6: Análise de instrumentos de apoio à inovação do governo federal na escala de prontidão tecnológica

TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5	TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
		EMBRAPII/EMBRAPII SEBRAE						
		EMBRAPII-SEBRAE / FOM. PROJ. INOV.						
		ABDI / PROG. NACIONAL CONEXÃO STARTUP IND.						
	SEBRAE / SEBRAETEC							
	BNDES / BNDES GARAGEM CRIAÇÃO							
		BNDES / BNDES GARAGEM ACELERAÇÃO						
	BNDES / BNDES INOVAÇÃO							
	BNDES / MPME INOVADORA							
	FINEP / FINANCIAMENTO REEMBOLSÁVEL							
	FINEP / FINEP CONECTA							
	BNDES / THAI							
	FINEP / INOVACRED							
						FINEP / AP. AQ. INOV. TELEC.		

Fonte: Martin et al (2019)

Permeando o contexto da utilização da Escala de Prontidão Tecnológica dentro de instrumentos de apoio à inovação, está a tomada de decisão desses agentes financiadores em alocar os recursos em um projeto em detrimento a outro. Esse desafio vem sendo retratado na literatura ao longo dos anos.

Após a criação da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) em 1983, foi criado um grupo de trabalho para auxiliar a avaliação dos financiamentos concedidos no âmbito do Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Empresa Nacional (Adten) intitulado “Projeto BID/Finep de Avaliação de Financiamentos” (FAÇANHA *et al.*, 1989).

Os critérios de avaliação desse projeto tinham como objetivo inferir burocracias de avaliação governamental baseada no processo decisório utilizado nas organizações. Esses critérios de decisões organizacionais espelhados seriam baseados tanto no processo de decisão adotado por uma organização, quanto no resultado das decisões organizacionais (FAÇANHA *et al.*, 1989). A partir dessa ótica, cinco pontos de

avaliação foram criados e ponderados para uma análise objetiva final, que são 1) Objetivos gerais dos projetos; 2) Avaliação do mérito intrínseco do projeto; 3) Capacitação tecnológica; 4) Relevância e viabilidade econômica; e 5) Independência tecnológica (FAÇANHA *et al.*, 1989).

Mais tarde, em 2015, a Finep, em conjunto com o BNDES, lançou o Plano de Desenvolvimento e Inovação da Indústria Química (PADIQ). Para receber o aporte, os candidatos deveriam submeter um plano de negócios e demonstrar capacidade empreendedora, consistência, ineditismo, impacto, baixo risco tecnológico e alta capacidade comercial e financeira, majoritariamente (KASPER, 2018).

Esses editais e fontes de fomento supracitados não descreviam a escala de prontidão tecnológica como um critério avaliativo, entretanto, pode se inferir que estivessem buscando tecnologias já amadurecidas pelas avaliações mercadológicas intrínsecas às análises realizadas. Ainda, pelas características, também traziam aspectos avaliativos mais próximos ao mundo corporativo, trazendo a visão de teorias organizacionais ou até mesmo planos de negócios como taxativos para a escolha do investimento.

Como outro exemplo, tem-se o Programa Finep InovaDoc, publicado no fim de 2022 para apoiar soluções na área das ciências da vida que estejam entre os níveis 6 e 8 da escala de prontidão tecnológica¹⁰. Os critérios de avaliação do edital perpassam o histórico de pesquisa do proponente na área, juntamente com seu currículo e da equipe; o nível na escala de prontidão tecnológica; apresentação de diferenciais competitivos; grau de inovação e potencial de mercado; além de parcerias e articulações da proponente¹¹. É interessante notar que além dos aspectos organizacionais, a incorporação da escala de prontidão tecnológica como métrica de análise e as parcerias e articulações são características presentes nas chamadas públicas mais recentes.

¹⁰ Chamadas públicas Finep - Programa Finep InovaDoc. Disponível em:

<<http://finep.gov.br/chamadas-publicas/chamadapublica/712>> Acesso em: <07/01/2023>

¹¹ Edital Programa Finep InovaDoc. Disponível em: <http://finep.gov.br/images/chamadas-publicas/2022/16_12_2022_Edital_Inova_Doc.pdf>. Acesso em: <07/01/2023>.

4. METODOLOGIA

O trabalho aqui em questão constitui-se de uma pesquisa social que pretende, através da utilização de metodologia científica, obter novos conhecimentos no campo da realidade social (GIL, 2008). Dado o estágio da literatura sobre a Escala de Prontidão Tecnológica, optou-se por realizar uma pesquisa exploratória com o intuito de não apenas explorar as definições da TRL, mas também o desenvolvimento do conceito, trazendo novas hipóteses para posteriores estudos (GIL, 2008).

Para a delimitação do escopo do presente trabalho, o primeiro passo foi o da adoção de definições dentro de uma escala de prontidão tecnológica padronizada, tendo em vista as diversas escalas e nomenclaturas tanto internacionais (MANKINS, 1995; VIK *et al.*, 2021) e nacionais (MARTIN *et al.*, 2019; ABNT, 2015; EMBRAPII; 2020).

Em seguida, o problema de pesquisa é construído e as hipóteses a partir dele são geradas. Posteriormente foi demonstrado o processo de seleção de casos e o protocolo de coletas.

4.1. Definição

A definição adotada aqui, construída através da revisão bibliográfica da literatura sobre tema, é a de que a TRL é uma escala linear de 9 níveis, sendo 1 o nível inicial de desenvolvimento tecnológico da escala e 9 o nível final de desenvolvimento tecnológico, que consegue avaliar através do conceito de figura de mérito o quão madura é a tecnologia avaliada naquele presente momento.

A Escala de Prontidão Tecnológica adotada para análise dos casos foi a utilizada como padrão avaliativo do programa de inovação nacional EMBRAPII. O nível de maturidade e a descrição geral para os produtos estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3: TRL e Descrição geral para produtos

Nível de maturidade TRL	Descrição geral para Produtos
1	Princípios básicos observados e reportados.
2	Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada.
3	Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica ou experimental.
4	Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais básicos de laboratório – “ <i>brassboard</i> ”.
5	Validação em ambiente relevante de componentes ou arranjos experimentais com configurações física final – “ <i>brassboard</i> ”.
6	Modelo do sistema ou subsistema, com protótipo de demonstrador em ambiente relevante.
7	Protótipo do demonstrador do sistema em ambiente operacional.
8	Sistema totalmente completo, testado, qualificado e demonstrado. Exemplos incluem aprovação.
9	O sistema já foi operado em todas as condições, extensão e alcance. Exemplos incluem o uso do produto em todo seu alcance e quantidade.

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em EMBRAPPII (2020)

4.2. Problema

A pesquisa do referido trabalho parte da seguinte pergunta: *seria a Escala de Prontidão Tecnológica suficiente enquanto ferramenta para a análise de maturidade tecnológica no contexto brasileiro?* A literatura demonstrou que a TRL possui desafios que precisam de atenção (MANKINS, 2009a; OLECHOWSKI et al, 2020; VIK et al., 2001).

Para responder tal perguntas, o contexto de criação da Escala de Prontidão Tecnológica não pode ser negligenciado. A TRL foi desenvolvida dentro da Agência Espacial Estadunidense e a NASA é uma agência independente do governo dos EUA e financiada por ele, com um orçamento anual de aproximadamente 0,5% do

orçamento total estadunidense, aproximando a quantias de US\$23,2 bilhões de dólares em 2019¹².

Além da quantidade de recursos financeiros generosos, a missão da agência espacial está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento científico e tecnológico. Um dos seus objetivos estratégicos é investir em tecnologias da próxima geração, além de expandir o entendimento científico do planeta Terra e do Universo e criar novas tecnologias espaciais¹³.

O contexto dentro da agência espacial, então, traz dois fatores relevantes para o desenvolvimento tecnológico. O primeiro é a disponibilidade de recursos financeiros, que não se transforma em um limitador direto como usualmente é para pesquisas em outros sistemas. O segundo fator seria o direcionamento da missão e os objetivos da NASA, direcionando uma percepção de valor da companhia e de tomadores de decisão para a ciência, pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Esse contexto traz uma característica única para os cientistas pesquisadores da agência estadunidense. Não precisar preocupar-se tanto com argumentos diferentes dos científicos e com restrições financeiras de pesquisa. Logo, o desenvolvimento da ciência dentro das unidades da agência preocupa-se exclusivamente com o desenvolvimento do conhecimento e da tecnologia. Alcançar um novo nível na escala de prontidão tecnológica depende do desenvolvimento científico, que quando comprovado, traz recursos e a possibilidade de avanço para novos níveis de desenvolvimento científico ou tecnológico.

O que acontece, então, para pesquisas em contextos diferentes? As preocupações com recursos e com as percepções de valores certamente se tornam relevantes, como detalhado no referencial teórico (MANKINS, 2009a; OLECHOWSKI *et al.*, 2020; VIK *et al.*, 2001), para o desenvolvimento tecnológico em contextos periféricos ou distintos ao da NASA.

Como um primeiro aspecto a analisar, coloca-se em perspectiva os recursos. Recurso, na economia, pode ser determinado como “um item natural, humano ou manufaturado que auxilia na produção de produtos e serviços” (MCCONELL *et al.*, 1987).

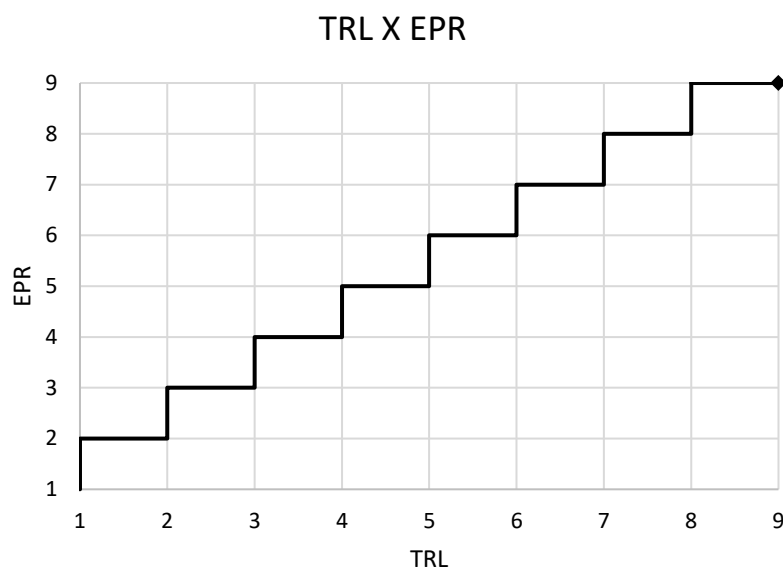
¹² Site oficial da NASA. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/about/index.html>> Acesso em: <25/08/2022>

¹³ Plano Estratégico da NASA de 2011. Disponível em: <https://www.nasa.gov/pdf/516579main_NASA2011StrategicPlan.pdf>. Acesso em: <25/08/2022>.

Olechowski (2020) em sua pesquisa com atores com experiência na TRL descobriu que um dos principais desafios relacionados à aplicação da Escala de Prontidão Tecnológica era o de dar informações sobre o esforço (determinado por recursos e tempo) requerido para alcançar determinado nível na TRL. A percepção seria de que alguns avanços na Escala requerem mais esforço do que outros (OLECHOWSKI, 2020).

Com esse impacto para o avanço tecnológico de uma pesquisa ou produto, a preocupação com a quantidade de recursos conquistados e acumulados ao longo do desenvolvimento tecnológico é chave. A hipótese levantada baseada na literatura, então, é de que só seria possível o avanço na maturidade de desenvolvimento tecnológico através da conquista de níveis de recursos compatíveis com o nível tecnológico que a pesquisa se encontra. A Figura 7 demonstra o movimento, ao longo do tempo, da conquista de recursos para o desenvolvimento tecnológico.

Figura 7: Caminho geral do desenvolvimento tecnológico na TRL e na EPR para uma pesquisa



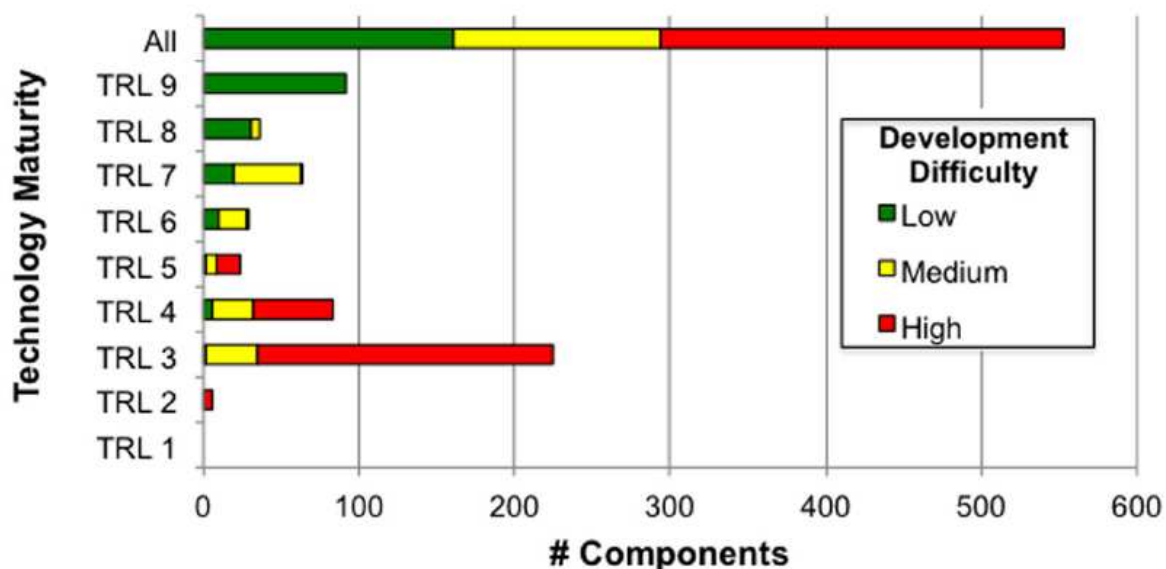
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 7, a hipótese é que para cada nível de maturidade da escala de prontidão tecnológica se alcançaria anteriormente o mesmo nível figurativo - 1 para 1, -2 para 2 e assim por diante - em uma escala nomeada de Escala de Prontidão de Recursos (EPR). Apenas com os recursos equivalentes ao seu respectivo nível de desenvolvimento tecnológico é possível começar o desenvolvimento para avançar na escala de prontidão tecnológica, onde o avanço exigirá conquistar cada vez mais recursos para a continuidade do desenvolvimento.

Na literatura, a avaliação da quantidade de recursos necessária para avançar na Escala de Prontidão Tecnológica já foi abordada, com a criação do Grau de Dificuldade para Avanço (do inglês, *Advancement Degree of Difficulty - AD²*) (BILBRO, 2008) e o Grau de Dificuldade Relativo para Avanço (do inglês, *Relative Advancement Degree of Difficulty - RAD2*) (CHANG, 2014). Ambas as escalas trazem uma percepção de risco e de impacto para a Escala de Prontidão Tecnológica, tentando quantificar a probabilidade de acontecer um evento adverso durante o evento tecnológico, além dos custos e do tempo de desenvolvimento (BILBRO, 2008).

Tanto a AD² quanto a RAD2 possuem como pressuposto que quanto maior o nível de avanço tecnológico, para uma mesma tecnologia, aquele avanço necessita de mais esforço (recurso e tempo) (BILBRO, 2008). Entretanto, essa relação não foi percebida na avaliação da NASA sobre a dificuldade de desenvolvimento de componentes de um de seus projetos, conforme demonstrado na Figura 8.

Figura 8: Dificuldade de Desenvolvimento de Projeto na NASA



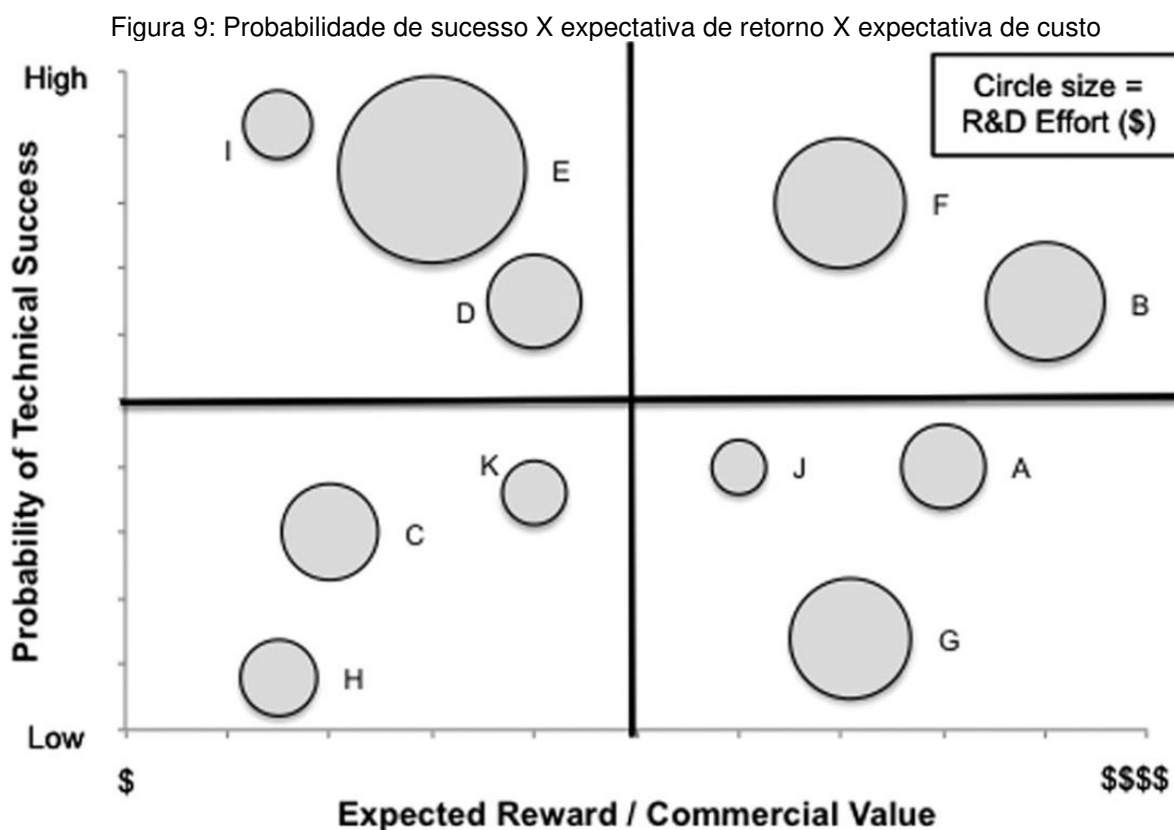
Fonte: Olechowski et al. 2020

Na Figura 8, percebe-se que para o projeto em questão na NASA, a maior dificuldade de desenvolvimento, que implementaria a maior quantidade de esforço, estava nos níveis 3, 4 e 5 da TRL, e não uma escalada constante de esforços dos níveis menores para os maiores como propostos pelas AD² e RAD2.

Fica claro que assim como a discussão de avaliação para o nível de maturidade representativo da escala de prontidão tecnológica é um aspecto crucial

(OLECHOWSKI *et al.*, 2020) para a implementação da escala, a hipótese seria de que na escala de prontidão de recursos é necessário um processo avaliativo para determinação do nível de recursos. Para isso, ainda se faz necessário uma análise mais profunda. Além disso, outra pergunta pode ser levantada. ***O que seria necessário para demonstrar para conseguir esses recursos?***

Para responder essa pergunta, a perspectiva dominante seria a da análise de risco e retorno (OLECHOWSKI *et al.*, 2020), usualmente utilizada em análises de investimentos e vista no mercado de capital de riscos (SANTIAGO, 2011; NANDA, RHODES-KROPP, 2017; ZIDER, 1998). A Figura 9 exemplifica como a percepção de sucesso financeiro, atrelada ao alto valor comercial e baixos custos, se conecta à avaliação de continuidade de tecnologias.



Fonte: Olechowski et al 2020

Na figura 9 foram descritas 11 tecnologias distintas, da letra “A” até a letra “K”, em três dimensões: A primeira dimensão, descrita no eixo horizontal, retrata a expectativa de retorno financeiro comercial da tecnologia, no momento da avaliação; a segunda dimensão, descrita no eixo vertical, retrata a probabilidade da tecnologia alcançar o seu sucesso técnico; a última dimensão da análise, demonstrada pelo tamanho dos círculos no gráfico, retrata a expectativa de custo financeiro da tecnologia até alcançar

o sucesso técnico. Essa representação gráfica dessa análise facilita a compreensão de um processo de tomada de decisão de investimento de esforços, por exemplo, em uma tecnologia “A”, com um potencial de sucesso financeiro comercial alto semelhante ao de uma tecnologia “B” que possui maior probabilidade de ser bem-sucedida, entretanto é mais cara de se desenvolver.

Essa avaliação financeira, no entanto, não é geralmente observada no processo de liberação de recursos das políticas de inovação para o desenvolvimento de pesquisas nacionais. No caso da EMBRAPPII, por exemplo, a liberação de recursos está atrelada ao resultado do projeto alcançado entre os níveis 3 a 6 da TRL, e não a uma avaliação de retorno financeiro (EMBRAPPII, 2020).

Fica nítido que o processo avaliativo é variável e dependente do contexto o qual a pesquisa/produto está inserido e pretende se inserir ao longo do desenvolvimento, ou seja, do formato que o agente que liberará o recurso faz a sua avaliação própria para liberação de recursos. O contexto no qual a pesquisa está inserida é relevante para o alcance dos recursos necessários para o avanço na escala de prontidão tecnológica. Nessa direção, pode se afirmar que os critérios de análise de um agente público ao financiar tecnologias possuem são diferentes dos utilizados pelos agentes privados para o mesmo processo de liberação.

A hipótese, então, seria de que o contexto influencia se aquela tecnologia, no estágio em que está, deve receber aquele recurso pleiteado ou não. E para receber esse recurso em determinado contexto, seria necessário demonstrar que alcançou determinado nível na escala de prontidão de recursos. Consequentemente, essa demonstração estará ligada ao processo avaliativo relacionado a essa escala.

4.3. Hipóteses

Dado o problema posto, as seguintes hipóteses foram elaboradas para serem estudadas e exploradas:

- Alcançar um determinado nível de recursos é determinante para o avanço na maturidade de desenvolvimento tecnológico.

- O agente que libera o recurso e sua respectiva forma de avaliação é determinante para o recebimento dos recursos necessários e para o avanço na maturidade de desenvolvimento tecnológico.

Apesar de não ser consenso de que a demonstração de um alcance de um determinado nível de recursos é o maior desafio da TRL (OLECHOWSKI *et al.*, 2020), no contexto da pesquisa, não obter o recurso para avançar significa não conseguir avançar no desenvolvimento ou na maturidade da tecnologia (MANKINS, 2009b; OLECHOWSKI *et al.*, 2020). Compreender como esses recursos são de fato alcançados pode auxiliar pesquisas futuras a trilhar caminhos menos árduos para o seu desenvolvimento.

4.4. Estudo de caso

Segundo Yin (2001), existem cinco principais estratégias de pesquisa nas ciências sociais, são elas: a realização de experimentos, os levantamentos, a análise de arquivos, a pesquisa histórica e os estudos de caso. Para a definição de qual estratégia deve ser utilizada, três análises devem ser realizadas (YIN, 2001).

A primeira análise liga-se ao tipo de questão da pesquisa. Os tipos podem ser representados pela série de perguntas “quem”, “o quê”, “onde”, “como” e “por quê”. A segunda análise se concentra na exigência de controle sobre eventos comportamentais da pesquisa, e a última é o grau de enfoque em acontecimentos históricos em oposição a acontecimentos contemporâneos (YIN, 2001).

A pesquisa do presente trabalho aborda um problema contemporâneo de constante mudança, o qual não é possível um controle do ambiente, da mesma forma como não ter o controle não afeta a análise, já que não é possível controlar os agentes no processo de avaliação de liberação de recursos ou controlar a sua liberação.

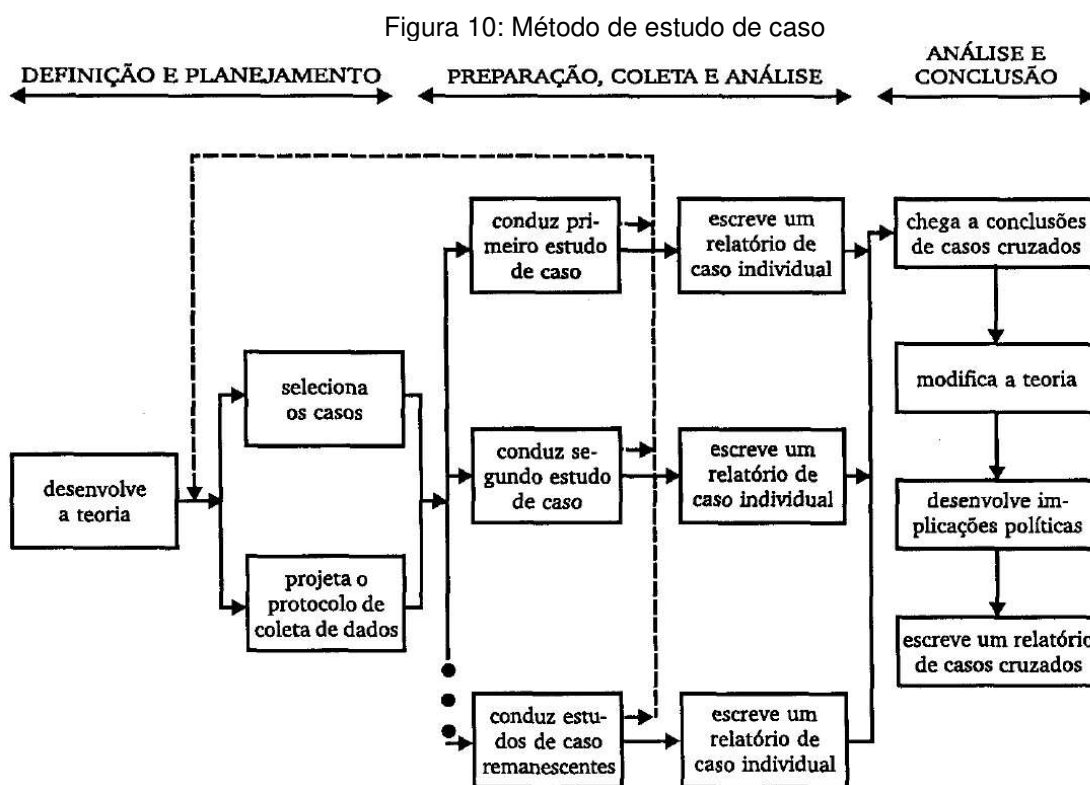
Para tentar responder às hipóteses traçadas para o estudo, então, o mais adequado é adotar uma abordagem que permita uma análise de como as pesquisas amadureceram tecnologicamente ao longo do tempo, além de entender como essas pesquisas alcançaram recursos durante suas trajetórias. Com essas respostas, seria possível entender, através da óptica da Escala de Prontidão Tecnológica, como as

pesquisas alcançaram os níveis de recursos necessários para avançar. A abordagem que permite essas respostas seria o estudo de caso.

Yin (2001) define estudo de caso como:

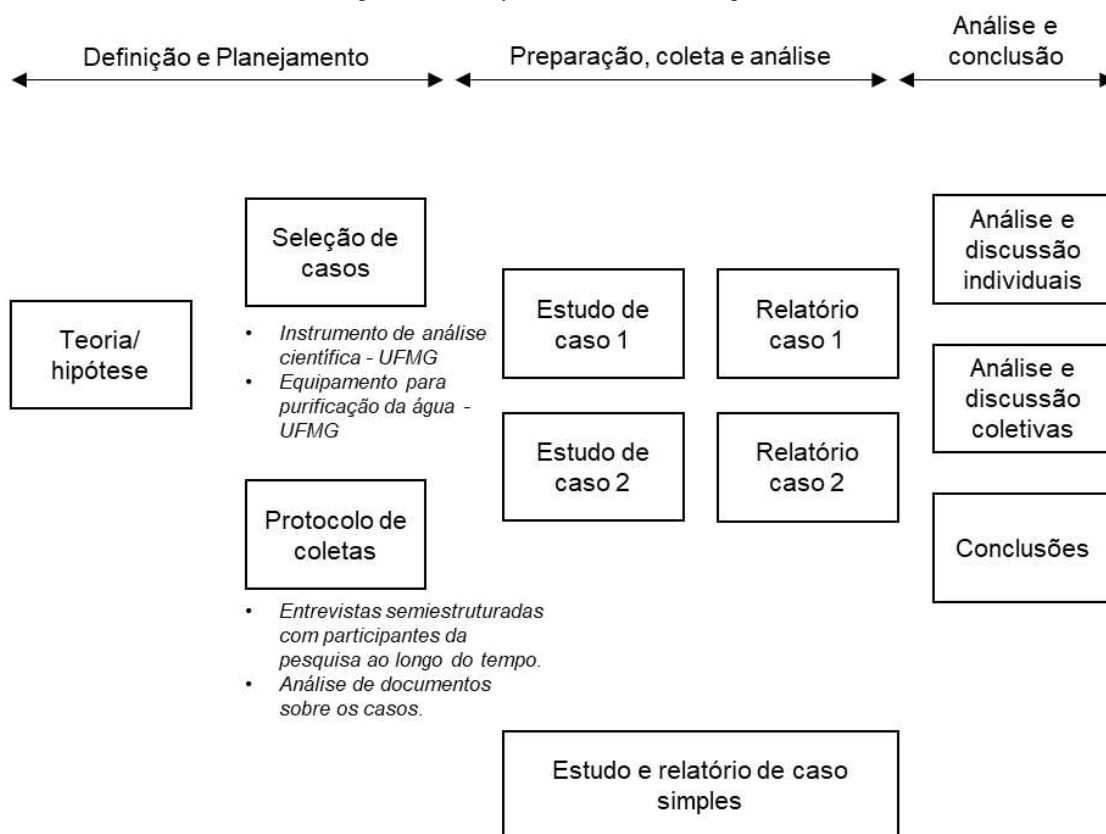
“uma investigação empírica que investiga um fenômeno dentro de seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos”. (YIN, 2001)

Tanto o contexto da pesquisa quanto o fenômeno da avaliação da Escala de Prontidão Tecnológica estão intrinsecamente relacionados, tornando viável a adoção da metodologia. O estudo de caso respeita as seguintes etapas, descritas na Figura 10, e para a análise do trabalho em questão a Figura 11 abaixo descreve as especificidades do método utilizado.



Fonte: COSMOS Corporation apud YIN 2001

Figura 11: Esquema da metodologia utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5. Protocolo de coletas

Para as coletas dos casos, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com os responsáveis pelo desenvolvimento da pesquisa e do produto nos casos selecionados.

As entrevistas foram guiadas por um bate-papo onde a pergunta inicial foi: "narre a trajetória da pesquisa até virar um produto desde a concepção da ideia até o estágio de maturidade atual do produto". Os entrevistados tiveram liberdade para falar a jornada temporal da pesquisa, com breves intervenções para tirar dúvidas relacionadas às hipóteses do trabalho.

Além das entrevistas, foram coletados materiais produzidos sobre os casos. Os materiais acessados foram aqueles produzidos pelos pesquisadores relacionados aos casos no âmbito científico e como parte da avaliação para o recebimento de recursos.

A narrativa dos casos foi elaborada através da análise temporal avaliada mediante observação dos materiais produzidos. Além disso, determinou-se que ambos seriam tratados de maneira anônima, respeitando a confidencialidade das informações das pesquisas. Com isso, os nomes dos pesquisadores, produtos e agentes envolvidos foram suprimidos da narrativa dos casos.

5. ESTUDOS DE CASO

Para avaliação das hipóteses levantadas, optou-se por escolher dois casos de desenvolvimento de tecnologia da Universidade Federal de Minas Gerais de áreas de conhecimento diferentes e que já estão em níveis avançados de maturidade tecnológica. Na sequência de cada um dos casos, optou-se por realizar as análises seguindo a metodologia descrita no Capítulo 4.

O primeiro caso é de um produto na área de instrumentação científica, com o desenvolvimento de um equipamento com uma técnica óptica inovadora para análises na escala nanométrica. O segundo caso é na área de química e tratamento de afluentes, com o desenvolvimento de um produto para tratamento da água de baixo custo que pudesse ser implementado em comunidades ribeirinhas afetadas por desastres ambientais.

Por fim, optou-se por realizar, utilizando as mesmas metodologias propostas, um caso estadunidense conhecido de pesquisa que recebeu recursos para se transformar em produto e acabou não sendo bem-sucedido.

5.1. Nanoscópio óptico de alta resolução

O equipamento referido foi lançado em maio de 2022 como o carro chefe da empresa nascente de base tecnológica que licenciou o produto. Até alcançar essa etapa, a trajetória da pesquisa do grupo responsável, as relações que conseguiu construir durante sua jornada e todo o empenho de diversos atores foram cruciais para que essa tecnologia alcançasse o estágio de desenvolvimento no qual se encontra.

Para maior compreensão sobre a tecnologia deve-se primeiro compreender o contexto desse rico processo de pesquisa, desenvolvimento e inovação. A narrativa da trajetória do desenvolvimento tecnológico no grupo começa em 2003, quando o pesquisador vai à uma conferência científica em sua área de especialização e toma conhecimento de uma nova técnica na área de microscopia e espectroscopia óptica.

A técnica em questão unia a técnica de espectroscopia óptica que consegue determinar propriedades físico-químicas de um material através da radiação eletromagnética emitida por uma amostra com a microscopia por varredura de sonda. Tratava-se da TERS, do inglês *Tip-enhanced Raman spectroscopy*, que utiliza de

espectroscopia Raman e microscopia de força atômica para conseguir “enxergar” para além das limitações físicas da óptica imprimidas pelo fenômeno de difração (ZHANG, 2016).

Ao deparar-se com a técnica, o pesquisador, aguçado por motivações de expansão do conhecimento científico em sua área de atuação, começa a sua pesquisa na área. Fica claro que a técnica base que dá origem à pesquisa do nanoscópio era fruto não apenas das pesquisas científicas apresentadas no Congresso que o professor havia visto em 2003, mas de uma proposta de solução tecnológica datada de 1928 e de desenvolvimentos tecnológicos em lentes, microprocessadores e outras tecnologias que precisavam ser desenvolvidas para que a TERS fosse uma realidade prática e não apenas teórica, demonstrada no início dos anos 2000.

Com a curiosidade científica aguçada, o pesquisador além de aprofundar seus conhecimentos sobre a técnica, entra em contato com o palestrante que havia apresentado a técnica TERS para aprender mais sobre o assunto. O professor foi bem recebido e introduzido prontamente para a rede de pesquisadores que estavam trabalhando na fronteira do conhecimento da técnica em questão. O processo de desenvolvimento dos primeiros protótipos laboratoriais no mundo capazes de executar TERS também é fruto do desenvolvimento de rede facilitado entre os pesquisadores da área.

No laboratório do professor tcheco, desenvolvedor do trabalho exposto em 2003, o primeiro protótipo foi construído. O pesquisador tcheco viu esse protótipo ser desenvolvido, pois estava na equipe que o fez e teve toda a liberdade para replicá-lo posteriormente no desenvolvimento da sua carreira científica, na Universidade de Rochester nos EUA. Esse mesmo professor, não apenas passou os conhecimentos para replicar o protótipo, mas convidou o professor brasileiro para passar alguns dias na Universidade estadunidense em janeiro de 2005 para montar as partes tecnicamente mais complexas e específicas, que envolviam unidades de controle e microeletrônica que foram disponibilizadas gratuitamente para terminar o protótipo. Por fim, também ficou acertado que um discente que terminava o doutorado na área sob orientação do professor brasileiro realizaria um pós-doutorado com o grupo de Rochester, onde ficou por três anos desenvolvendo os trabalhos de pesquisa e aprendendo sobre o equipamento, antes de voltar ao Brasil em 2009.

Até o professor ir para a Universidade de Rochester, no entanto, os caminhos científicos tradicionais foram traçados em paralelo às conversas para montagem do protótipo. O pesquisador aprofundou suas especializações na técnica, orientou discentes da UFMG em estudos sobre TERS e precisou convencer a Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT) e órgãos de fomento a financiarem a aquisição das peças que ele precisava para montar as partes antes de ir, em 2005, para Rochester finalizar as partes do protótipo para montagem local do equipamento.

A motivação da pesquisa por parte do professor era a curiosidade científica. A possibilidade de ultrapassar uma barreira física outrora intransponível possibilitava uma ampliação na capacidade de fazer caracterização, e no limite, de fazer ciência. Essa foi a busca que motivou todos os movimentos e que provavelmente reverberou com os próprios pesquisadores da área, trazendo o desafio científico como um processo de colaboração em prol da resolução de um problema.

Com o protótipo instalado em território nacional, a técnica passou a ser aplicada para a produção de conhecimento científico, que era o objetivo finalístico da trajetória do pesquisador. Já em 2006, o Laboratório da área de pesquisa havia se instaurado no Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas da UFMG com o objetivo de produzir conhecimento científico relacionado à técnica e ao equipamento recém-instalado. O processo de pesquisa do laboratório, como usualmente ocorre em uma ICT, caminha lado a lado com ensino. Novos pesquisadores foram sendo formados para TERS. Além disso, pesquisadores de outras áreas começaram a colaborar na produção de conhecimento utilizando a técnica, intrinsecamente ligada a pesquisas em nanomateriais que eclodiam ao mesmo momento em departamentos próximos. O conhecimento científico em caracterização de nanoestruturas de carbono e materiais de baixa dimensionalidade, por exemplo, foi puxado pelas características colaborativas intrínsecas à aplicação da técnica “carro chefe” do laboratório.

Mesmo com todo o avanço tecnológico que propiciou a proposta de 1928 sair da teoria e chegar na prática, ainda existiam desafios claros para os pesquisadores da área. O principal deles, por consenso, estava relacionado à “nano antena” responsável por captar o sinal eletromagnético para a técnica de espectroscopia Raman. Além de extremamente desafiador, o processo de fabricação dessas estruturas em escala nanométrica, fruto de um processo pouco escalável, gerava poucas “pontas” satisfatórias para a aplicação no equipamento e para a produção de conhecimento

científico, com pouca eficiência, ocasionando uma baixa ampliação do sinal – importante indicador para a caracterização. O desafio era claro, mas não existia alternativa tecnológica para tratá-la e todas as pesquisas no mundo evoluíam dentro dessa limitação, o que não era diferente para os pesquisadores no laboratório brasileiro. Todos, de uma forma ou de outra, buscavam resolver esse desafio tecnológico.

O caminho para a solução do desafio da nanoantena pelos pesquisadores não foi linear e nem tão pouco um momento “eureka” clássico. Apesar de almejar resolver esse problema técnico, o grupo continuou desenvolvendo a pesquisa científica da área, promovendo mais ensino e colaboração e se desenvolvendo em outras áreas, como por exemplo a gestão. Nesse processo de crescimento, foi convidado para auxiliar no desenvolvimento de uma área de nanometrologia no INMETRO, a partir de um contato que teve com o presidente da instituição à época que presenciou uma palestra que deu na instituição em 2007. A parceria estimulou a instituição não só no desenvolvimento de conhecimento relacionado à nanometrologia, mas a expandir mais tarde os conhecimentos e pesquisas com a técnica TERS aplicada aos desafios da instituição expandindo o potencial de aprendizado e desenvolvimento científico na área, formando pesquisadores letrados na técnica TERS, agora em duas ICTs locais. E a expansão do conhecimento e colaboração ampliou o número de pesquisas e novas descobertas relacionadas no Brasil.

Voltando a 2009, o pesquisador discente que estava em Rochester retorna à UFMG, onde se torna em breve docente, e soma todo o conhecimento adquirido com a experiência com os pesquisadores que já trabalhavam na técnica há alguns anos, colocando os grupos de pesquisa de TERS nacional ainda mais em destaque na comunidade científica global. Mesmo assim, os avanços de conhecimento tecnológico que culminaram no que veio a ser a nanoantena só aconteceriam após meia década.

Outro ponto importante na expansão dos conhecimentos do grupo, em relação às habilidades consideradas relevantes para o avanço tecnológico do equipamento, foi o convite ao professor líder para tornar-se diretor do NIT da ICT, em 2010. No NIT, o pesquisador teve contato com outro aspecto das tecnologias produzidas em uma ICT pública que tinha pouco conhecimento: o processo de transferência tecnológica que permitia a utilização do conhecimento gerado com os anos de pesquisa,

representando a ICT em um produto para o mercado. O mecanismo principal era a proteção intelectual através das patentes.

Ao entender sobre patentes, o professor acaba submetendo para proteção no INPI ao longo de 2011 e 2012, patentes relacionadas a desenhos de nanoantenas para o nanoscópio que, em sua visão, representam ideias futuristas de desenvolvimento para a tecnologia, assim como em 1928, de quando o TERS foi desenvolvido e precisou de vários anos de desenvolvimento tecnológico aplicado para conseguir tornar-se uma realidade experimental. Mas o conhecimento em relação à transferência de tecnologia ampliou a visão do grupo para a importância da visão mercadológica e de negócios para o desenvolvimento da tecnologia e consequente chegada ao mercado.

Com os aprofundamentos das pesquisas de TERS nacional com o laboratório e o instituto nacional, novas ideias para a resolução do problema das nanoantenas surgiam em paralelo ao aumento da conexão entre ambas as instituições. Em 2013, a relação de parceria entre as entidades ficou ainda mais forte. Com uma inovação de gestão, o instituto nacional criou a figura de Laboratório Associado e fez uma parceria com a UFMG, especificamente com o laboratório do grupo desenvolvedor do nanoscópio, sendo esse o primeiro Laboratório Associado. Foi desta parceria que surgiu a tecnologia que é carro-chefe da empresa *spin-off*.

Resgatando o histórico do desenvolvimento da nanoantena, há alguns anos, na cadeia de valor do silício, já se usava em escala industrial a produção de chips e quaisquer componentes eletrônicos em escala cada vez menor, uma tecnologia de corrosão no silício que consegue fazer fôrmas, moldes para produção com alta precisão e confiabilidade, para escalas muito pequenas.

O pesquisador tcheco em Rochester tinha relacionamentos com pessoas que usavam essa tecnologia constantemente. Em um dado momento, teve a ideia de começar a utilizar essa tecnologia de corrosão no silício para a produção das pontas. Com essa evolução da pesquisa, ele conseguiu começar uma demonstração de escala confiável para a produção das nanoantenas para a aplicação de TERS.

Em paralelo, as pesquisas nacionais em TERS estavam indo de encontro à resolução da outra questão das nanoantenas. Já com as escritas das patentes, o grupo tentava melhorar a capacidade de captação dos sinais das pontas. Uma dessas linhas foi trazida em conjunto justamente com a colaboração do INMETRO, que tinha em seu

corpo de técnicos um aluno de doutorado orientado pelo professor que voltou ao Brasil em 2009, e que juntos trouxeram uma inovação em formato de nanoantena. A inovação trazia um formato cônico com um recorte na ponta, formando uma cavidade plasmônica. Esse novo formato traria novos efeitos físicos que possibilitaria, na teoria, o aumento significativo de captação do sinal. Entretanto, o desafio técnico para conseguir produzir essa nanoantena no formato desejado ainda era impeditivo.

Catalisado por ambos os laboratórios nacionais, observando a pesquisa do pesquisador tcheco, o grupo conseguiu fazer a conexão entre as duas técnicas de produção da ponta. A corrosão no silício poderia ser aplicada para produção da ponta bipiramidal pensada no Brasil. Pesquisas e testes para comprovar isso aconteceram e demonstraram-se satisfatórios. A partir de então, seria possível fabricar com confiabilidade e em escala, nanoantenas com altíssima capacidade de captação de sinais.

Nesse contexto, o professor entrou em contato com outro professor, mas agora de uma área diferente de conhecimento, da Engenharia de Produção. O professor da produção, de forma técnica, explica para o grupo de pesquisa que o protótipo que estavam construindo precisava de uma evolução direcionada à experiência do usuário para conquistar o mercado. Precisava preocupar-se com a facilidade do uso, com o *design* do produto, operacionalização e confiabilidade, entre outras questões que não haviam sido elaboradas ainda pelos pesquisadores dos laboratórios da UFMG e da instituição nacional.

Para avançar no desenvolvimento da tecnologia, o caminho vislumbrado pelo grupo de pesquisa direcionava para o desenvolvimento daquele protótipo em produto. Para o desenvolvimento do produto, no entanto, o entrave passou a ser os recursos financeiros. Até então haviam sido gastos recursos consideráveis, na ordem de milhão de reais, sendo necessário elevar o nível de escala de grandeza para a casa da dezena de milhões de reais.

Neste momento, o laboratório da UFMG e o laboratório associado da instituição nacional já haviam demonstrado valor científico significativo, com parcerias científicas inúmeras, nacionais e internacionais, e pedidos de patentes para tecnologias desenvolvidas. O desenvolvimento nacional da pesquisa em TERS no estado da arte

foi tanto que o 4º Congresso Internacional sobre a tecnologia aconteceu no Rio de Janeiro, em 2014¹⁴.

Em 2016, com a ideia de construir uma empresa nascente de base tecnológica para explorar e continuar o desenvolvimento das tecnologias, após a fase em que se encontrava, o grupo conseguiu uma fonte de financiamento diferente das que estava habituado. Conseguiu recursos para a construção de um Plano de Negócios com uma empresa de consultoria.

O Plano de Negócios desenvolvido, além de construir novas bases de conhecimento, necessárias para o desenvolvimento de uma empresa, como por exemplo, conhecimentos mercadológicos, estratégias de preço e venda e conhecimentos de planejamento financeiro, trouxe novamente a realidade da necessidade de capital para avançar à mesa. A conclusão da empresa contratada foi a de que, para os primeiros anos de desenvolvimento empresarial (pós término do processo de desenvolvimento de produto iniciado com os órgãos financiadores), seria necessário mais uma quantia de aproximadamente 2,5 milhões de reais, mas o valor não foi considerado realista.

Conseguir esse recurso era ainda mais desafiador no estágio em que o produto se encontrava. As agências governamentais, os órgãos financiadores e os parceiros que os laboratórios nacionais conquistaram até aqui dificilmente alocariam recursos para o desenvolvimento do produto no contexto dessa empresa nascente.

O reconhecimento científico notório chamou atenção de autoridades públicas que conseguiram, por meio de arranjos, o financiamento necessário da ordem de R\$ 12 milhões para uma próxima etapa. Uma agência de desenvolvimento, através do programa governamental da Embrapii, em parceria com a unidades da UFMG e do SENAI, aportou os recursos necessários para o desenvolvimento do equipamento, do nanoscópio e de seu software controlador. Além disso, através do SibratecNano, os pesquisadores conseguiram recursos financeiros para a produtização das sondas.

Com a aprovação dos recursos, a nova etapa do desenvolvimento tecnológico se iniciou. O contato com as instituições parceiras, o avanço no desenvolvimento do

¹⁴ Livro sobre o 4º congresso em TERS. Disponível em: <<http://www.issp.ac.ru/ebooks/books/open/TERS-4.pdf>>. Acesso em: <05/09/2022>

produto e o contato com novos conhecimentos, sobretudo trazidos pelo professor da produção, abriu novos caminhos para o grupo.

A primeira vertente que mudou foi a composição do time. Já era clara a necessidade de ter não apenas físicos no time, mas também engenheiros e cientistas da computação que pudessem fazer conexões com ambas as áreas do conhecimento. A outra vertente está ligada à continuidade do desenvolvimento. As opções de licenciamento para uma empresa privada continuar o desenvolvimento e explorar comercialmente aquela nova tecnologia ficava cada vez mais preterida em comparação ao desenvolvimento de uma empresa por pesquisadores do laboratório para que essa, em parceria e “simbiose” com os laboratórios, pudesse fazer o licenciamento da tecnologia e avançar com os produtos.

O grupo de pesquisa continuou o desenvolvimento intenso dos produtos até o início de 2019, onde consideravam que já estavam próximos de conseguir a primeira versão do produto segundo os cronogramas das agências de fomento. Foi nesse momento que o professor focou novamente na busca de financiamento e procurou a agência de investimentos de uma fundação de apoio da UFMG.

A agência de financiamento surgiu na própria ICT em 2013. Trata-se da iniciativa de uma fundação da UFMG, que realizou investimentos em pesquisas para chegar ao mercado através do desenvolvimento de uma empresa nascente de base tecnológica. Em 2016, com os aprofundamentos, a iniciativa tornou-se uma gestora de investimentos regulada e lançou um fundo de investimento de capital semente para investir em empresas nascentes de base tecnológica valores de, em média, R\$ 1 milhão.

A conexão com a agência de investimentos parecia o casamento perfeito, mas o financiamento através do investimento na empresa precisava superar alguns desafios que levaram tempo. O primeiro desafio foi a adaptação do plano de negócios que havia sido montado pela consultoria para um valor consideravelmente mais baixo, de R\$1,5 milhão, mas que ainda fosse minimamente viável e factível. O segundo desafio foi a construção do arcabouço jurídico para a transferência de tecnologia e criação da empresa, dada a relação de variados órgãos da esfera pública e privada e as suas governanças diferentes, complexas e que ou não abordavam as questões que estavam sendo tratadas ou tinham regulações extremamente recentes. O terceiro

desafio foi os atrasos no desenvolvimento do produto. Somados, os desafios fizeram com que o recurso da agência de investimentos fosse liberado para a empresa apenas em 2022.

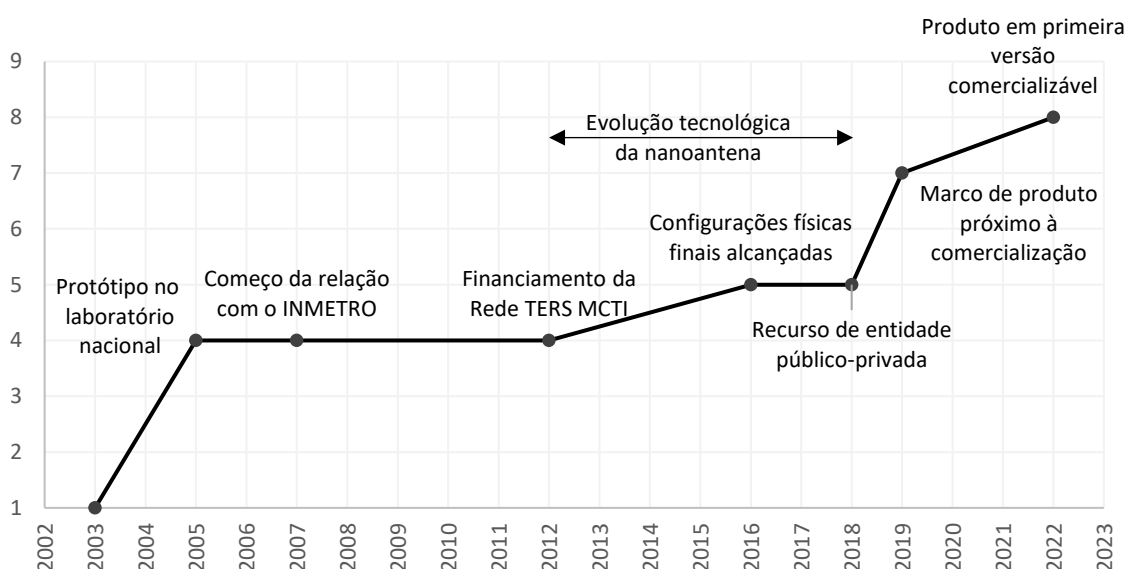
Com o recurso da agência de investimentos, a empresa nascente de base tecnológica para comercialização do nanoscópio foi constituída e começou o desafio da comercialização do produto recém finalizado, que envolvia aprimoramentos e aperfeiçoamentos das primeiras versões até chegar em uma versão estável e que pudesse ser comercializada em escala maior.

5.2. Análise: Nanoscópio

5.2.1. Trajetória da maturidade tecnológica na TRL do nanoscópio:

A Figura 12 ilustra, na perspectiva do autor e baseada no estudo do caso em questão, o desenvolvimento do produto, segundo a Escala de Prontidão Tecnológica ao longo dos anos de maturidade da tecnologia.

Figura 12: TRL Caso nanoscópio



Fonte: Elaboração do autor

O primeiro ponto notado é que, a partir do momento em que se iniciou o processo de pesquisa do grupo, em 2003, o professor não buscou desenvolver uma pesquisa/produto do zero no cenário nacional. O movimento, através da gentileza e

confiança científica de seus pares, foi o de importar o protótipo no estágio em que estava para o Brasil, em 2005.

Nota-se também que o desenvolvimento da pesquisa se manteve no nível quatro de maturidade tecnológica por muitos anos, de 2005 até 2012. Nesse período, o projeto continuou recebendo e acumulando recursos variados, diversos pesquisadores começaram a participar das pesquisas nos laboratórios, agentes de financiamento auxiliaram com recursos financeiros e mais uma ICT começou a participar do desenvolvimento da pesquisa intensivamente. Apenas em 2012, quando é criada uma rede nacional de pesquisa financiada pelo MCTI, e na sequência a associação do INMETRO ao laboratório da UFMG, cedendo recursos de bolsas, é que a pesquisa começa a avançar até chegar ao TRL cinco no ano de 2016.

Outro ponto que se destaca é o desafio para o avanço da maturidade da pesquisa. Com o protótipo em mãos, o desafio tecnológico para avançar o desenvolvimento de produto imposto pelas restrições tecnológicas à época não era impeditivo, não permitindo o avanço do produto. Foi necessário que os grupos de pesquisa não só nacionais quanto internacionais desenvolvessem novas técnicas que possibilitaram, ao longo de 2012 a 2018, a evolução das nanoantenas, o que ocasionou o desenvolvimento do produto.

Em 2014, o avanço do desenvolvimento do produto continua com a liberação dos recursos das entidades público-privadas. O movimento para se alcançar o TRL 5 já estava em andamento, mas a quantidade de recursos necessários para o desenvolvimento nessas etapas exigia uma escala muito maior de recursos financeiros daquela que eles haviam conquistado até o momento.

A partir daí o constante desenvolvimento do produto se deu com a interlocução dos grupos de pesquisa nacionais e das entidades responsáveis pelo desenvolvimento do produto, que trabalharam em conjunto sob um cronograma de entregas até a completude do desenvolvimento da tecnologia. Em 2019, o desenvolvimento chega em um marco de qualificação entre os pesquisadores e equipe de desenvolvimento, no qual estaria próximo de alcançar o fim da primeira versão possivelmente comercializável do produto, chegando no nível sete da escala de prontidão tecnológica.

Por fim, a equipe de desenvolvimento termina as entregas do produto e, em 2022, a tecnologia está pronta para ser comercializada e alcança o nível oito da escala de prontidão tecnológica.

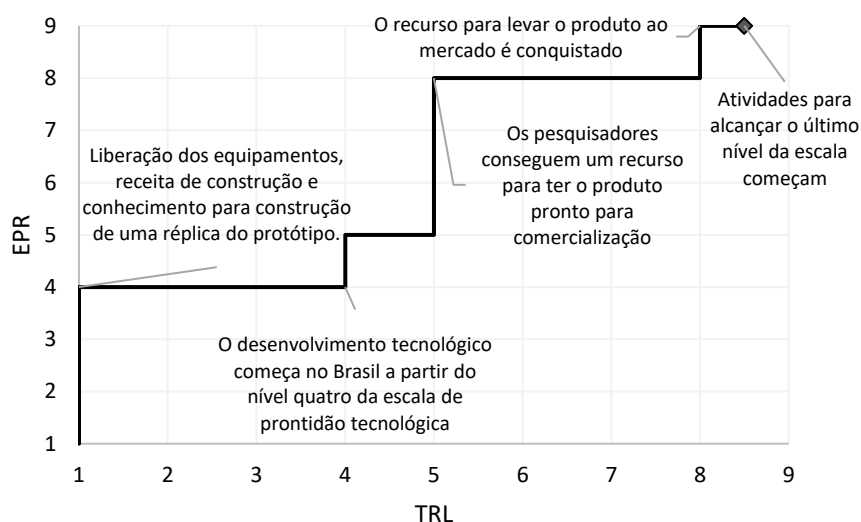
No caso do nanoscópio, para começar o desenvolvimento da tecnologia em ambiente que não fosse o laboratório dos pesquisadores, seria necessário muito recurso financeiro.

O investimento para que a tecnologia pudesse alcançar o mercado (TRL 9) foi de uma escala menor de recurso financeiro do que foi necessário para o desenvolvimento do produto (até TRL 8). Entretanto, o processo de convencimento para a liberação do recurso foi diferente do processo de convencimento que os pesquisadores estavam habituados nas outras fases de maturidade.

5.2.2. Escala de Prontidão de Recursos e TRL para o nanoscópio:

No caso do nanoscópio, a Figura 13 abaixo ilustra os caminhos que os pesquisadores tomaram ao longo do tempo para conseguir avançar no desenvolvimento tecnológico.

Figura 13: TRL e EPR para o nanoscópio



Fonte: Elaboração do autor

Para o começo do desenvolvimento da pesquisa que culminaria no produto, o professor conseguiu junto ao grupo de pesquisa do professor tcheco algumas peças, dimensões, distâncias e especificações de como construir o protótipo do equipamento para aplicação da técnica TERS. Em conjunto com financiamentos públicos, comprou

outras peças e trouxe o desenvolvimento tal como estava no Estado da Arte para o Brasil. Para convencer o grupo de pesquisa do professor tcheco, foi necessário que o grupo de pesquisa nacional demonstrasse sua competência científica notória. Por ser complementar aos conhecimentos e habilidades do grupo de pesquisa na universidade estadunidense, o professor tcheco acreditou que o grupo pudesse auxiliar o avanço no Estado da Arte de sua pesquisa e, por essa razão, acreditou que a liberação de recursos seria pertinente. Para os órgãos públicos financiadores, o processo de convencimento foi o tradicionalmente realizado, onde submete-se a um edital de pesquisa escrevendo um projeto que demonstra méritos anteriores e futuros da pesquisa.

Em seguida, foram necessários sucessivos aportes de recursos, através de financiamento público durante longos anos para que fosse possível alcançar o nível de protótipo com suas configurações finais.

Da mesma forma, quando o desenvolvimento tecnológico alcança um avanço científico que possibilita o avanço no produto, as atividades direcionadas a esse crescimento só começam quando os pesquisadores conquistam os investimentos de recursos financeiros da Embrapii e da agência de desenvolvimento, além de recursos da UFMG e instituto nacional no âmbito econômico, científico e humano. O processo de convencimento dos agentes públicos, nesse contexto, não foi via editais, mas sim um processo em que o grupo de pesquisa demonstrou um grande potencial de desenvolvimento tecnológico científico com externalidades para Brasil e Minas Gerais baseado no produto e potencial negócio que estava sendo construído. Ao perceber essa potencialidade, os agentes públicos e público-privados resolveram se unir em um processo particular para conseguir habilitar os recursos que estavam sendo pleiteados pelo grupo de pesquisa.

Por fim, para alcançar o mercado após a finalização do produto, foi necessário outro investimento, de mais recursos financeiros de um fundo de capital de risco privado para que o movimento de alcançar o mercado pudesse começar. Esse agente possui um processo decisório para liberação de recursos distinto dos agentes anteriores. Ligado a motivadores do capital privado, foi necessário demonstrar um potencial ligado à lógica de risco e retorno financeiro de curto prazo para o agente investidor conseguir realizar o aporte, que foi de ordem significativamente menor do que os investimentos anteriores. É importante destacar que o fundo de capital de risco que

realizou o investimento possui direcionamento para investimentos de grande densidade tecnológica, realizando avaliações menos agressivas financeiramente dentro da lógica de risco e retorno, aceitando um grau de risco mais elevado em troca de retornos mais baixos do que o habitual ao mercado.

5.3. Produto para tratamento de água em comunidades locais

O Projeto começou no final de 2015 no contexto de um dos maiores desastres socioambientais da história do nosso país. Em 5 de novembro de 2015, a barragem de Fundão, da mineradora Samarco, controlada igualmente pela Vale e pela BHP Billiton, se rompe e lança aproximadamente 45 milhões de metros cúbicos de rejeitos no meio ambiente¹⁵.

Os movimentos da comunidade científica local tanto para análise dos impactos socioambientais, de pressão dos órgãos competentes para tomarem atitudes e fazerem com que as empresas participantes fossem responsabilizadas, quanto para amenizar os impactos se iniciaram nos dias seguintes ao rompimento.

Um dos esforços iniciados veio de um grupo de tecnologias ambientais do Estado de Minas Gerais. O professor responsável, que é docente do Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas da UFMG, possuía algumas bolsas de pesquisa e instigou duas pesquisadoras a pensarem em pesquisas que pudessem auxiliar a sociedade no enfrentamento à tragédia. O tema que o grupo decidiu abordar era relacionado à qualidade da água, onde o grupo possuía expertise.

Os pesquisadores começaram o processo de desenvolvimento de um dispositivo para tratamento de água que pudesse ser implementado nas comunidades ribeirinhas afetadas e que fosse simples. O professor orientador do projeto já possuía experiência significativa em desenvolvimento de pesquisas que já estavam em aplicação no mercado. Com os aprendizados dessa trajetória, ele já incorporava no processo de desenvolvimento de suas pesquisas as estratégias que pudessem facilitar um rápido aprendizado para o avanço da pesquisa em conexão com os agentes da sociedade.

¹⁵ Informações retiradas do endereço eletrônico do IBAMA em página dedicada ao desastre ambiental. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/cites-e-comercio-exterior/cites?id=117>> Acesso em: <17/09/2022>.

Nessa direção, ele passa essas práticas às duas pesquisadoras que integraram a equipe do projeto, uma em nível de graduação e outra em nível de mestrado.

Nas primeiras etapas de desenvolvimento da tecnologia, os pesquisadores começaram a testar parâmetros de tratamento de águas dentro do laboratório para tentar identificar faixas ótimas para o tratamento utilizando técnicas de coagulação, desinfecção e floculação. Como são técnicas relativamente simples, a hipótese é que seria possível aplicar alguma solução para melhorar a qualidade da água para as comunidades. Com isso, adotaram uma estratégia de realizar uma revisão bibliográfica extensa para as técnicas antes de escolher um primeiro direcionamento laboratorial.

Com a revisão bibliográfica realizada, as duas orientandas do professor começaram um processo sistêmico de pequenos testes laboratoriais com o mix de técnicas que haviam encontrado com o intuito de determinar as que teriam melhores parâmetros de tratamento. Elas precisavam de amostras de água que pudessem utilizar nos testes para começar as pesquisas laboratoriais e de alguns insumos e matérias primas laboratoriais. Por essa razão, fizeram coletas presenciais de amostras em Mariana, cidade relativamente próxima de Belo Horizonte, local do laboratório, além de utilizar recursos de projetos de pesquisa sob coordenação do professor para aquisição dos insumos de pesquisa. Para os testes de bancada com as amostras e os insumos, mais pesquisadores se envolveram e continuaram a se envolver a partir daquele momento na pesquisa.

Os primeiros testes tinham como objetivo a detecção de uma possível sedimentação barrosa dos efluentes contaminados como processo de purificação, o que não se demonstrou. Em seguida, testou-se coagulantes, floculantes e filtros para a remoção da turbidez da água, além de testes de condutividade, de pH e parâmetros importantes para a determinação se os testes de bancada estavam sendo exitosos. Como um dos fatores primordiais que os pesquisadores determinaram para o sucesso da pesquisa era o seu baixo custo e fácil usabilidade, os parâmetros foram estressados substituindo testes combinados e testes solos das variadas técnicas para diminuição da complexidade e preço. Chegaram à conclusão, nessa primeira fase, de que a utilização de filtros seria essencial para diminuir a turbidez da água, além de exigir menos manutenção. Além disso, foi possível determinar as dosagens ótimas para as aplicações das técnicas dentro da escala laboratorial.

Para validação dos testes, a equipe decidiu produzir um protótipo com capacidade de tratamento de 20L de água em um galão. O objetivo foi o de testar em uma escala maior do que as pequenas quantidades laboratoriais que estavam usando para validação das técnicas. No processo, descobriram que precisavam aprimorar o modelo de agitação para uma agitação mecânica para promoção do resultado da coagulação, sendo exitoso no processo de clarificação da água.

Ao mesmo tempo que as validações de bancada estavam avançando, os pesquisadores envolvidos começaram a participar e se envolver com programas de inovação e empreendedorismo. O professor responsável já tinha tido experiências empreendedoras e serviu como um estímulo aos estudantes que se envolviam com projetos a participarem e aprenderem um pouco mais sobre questões não historicamente habituais para pesquisadores da área técnica, como estratégia e método de vendas, gestão administrativa de um projeto, além de organização e planejamento financeiro. A bolsista de graduação que iniciou com o projeto já havia começado a participar desse tipo de programa e entendeu que seria importante inscrever o projeto de tratamento de água para trabalhar melhor as formas de aplicar a tecnologia na sociedade após o seu desenvolvimento. Os outros pesquisadores também se envolveram no aprendizado sobre o empreendedorismo e uma jornada paralela ao desenvolvimento técnico de pesquisa se intensificou.

O primeiro programa de inovação que o projeto participou foi o programa da Biominas Brasil chamado *BioStartupLab*, em 2016. Já o programa *BioStartup Lab* foi um programa de pré-aceleração pioneiro no Brasil que começou após a Biominas firmar um acordo com o SEBRAE-MG em 2015. O programa foi o primeiro da área biológica e aplicava um intensivo educacional mercadológico de aproximadamente um mês para projetos em estágio bem inicial na área de Bio.

Os aprendizados que se acumularam impactaram os direcionamentos das ações dos pesquisadores e da pesquisa de desenvolvimento do produto. Com a percepção da importância dos aspectos de negócios para o desenvolvimento e maturidade da tecnologia, os pesquisadores entenderam que precisariam de parceiros para o desenvolvimento do produto. Havia ficado evidente que o grupo não conseguiria dar os próximos passos sozinhos por não possuir os recursos necessários.

Como o grupo e o professor já possuía histórico com suas pesquisas e projetos que haviam chegado ao mercado, um parceiro naturalmente surgiu de relações com pesquisas anteriores. Um dos empresários da indústria de insumos químicos, que já tinha contato com o professor, se ofereceu para auxiliar.

Em sua empresa, ele possuía diversos tanques de 1000L para transporte de álcool. O empresário ofereceu para a equipe do projeto dois desses tanques para a realização do projeto. Seria então, um protótipo de 1000L para uma escala mais avançada de testes de tratamento da água, onde um tanque faria o processo de tratamento de água e outro estocaria a água tratada. A proposta representava um salto de escala significativo comparado ao protótipo anterior de 20L. A ideia do empresário seria a de trazer os testes para o mais próximo possível da realidade da aplicação. Os pesquisadores aceitaram o desafio e começaram a construção do protótipo de 1000L.

Para a produção do protótipo, a empresa cedeu além dos tanques, mão de obra especializada e a infraestrutura física da empresa em um galpão da região metropolitana de Belo Horizonte. Após o término do protótipo, os pesquisadores buscaram uma nova parceria para testar o protótipo recém-construído. Nesse caso, conseguiram a concessão do uso de uma das fazendas de uma empresa de laticínios de Minas.

Os pesquisadores ficaram dois dias na fazenda, em 2018, preparando e realizando os testes do protótipo no rio que cortava a localidade. Os testes mostraram que a dificuldade que haviam observado no processo de agitação e o impacto no processo de coagulação se intensificou. Foi necessário realizar mudanças de parâmetros e de processos de agitação ao longo dos testes para que fosse possível o tratamento de fato da água. Ao final da experiência, além de vários aprendizados, os pesquisadores entenderam que a água se encontrava limpa e respeitando os parâmetros regulatórios.

Apesar de terem alcançado o resultado positivo, para os pesquisadores ficou evidente que, antes de conseguir ter um produto pronto para o mercado, ainda precisariam evoluir o protótipo.

Constatado que o protótipo deveria melhorar, os pesquisadores decidiram buscar alternativas de desenhos industriais para sanar as deficiências encontradas. No processo, buscaram empresas júniores para desenhar o projeto de engenharia de um

tanque que pudesse gerar resultados melhores. Dois pontos críticos foram observados com os projetos. O primeiro era o formato do tanque e o segundo era o processo de agitação. Constatou-se que para melhores resultados seria necessário que o formato do tanque fosse cônico, ao invés de cúbico e que a agitação fosse realizada através de pás de forma mecânica.

Após a realização dos testes do protótipo e da constatação da necessidade de mudança no direcionamento do desenvolvimento que estava, o grupo chega em um obstáculo importante. A mudança no formato aumentaria significativamente os custos de produção. O parceiro que havia cedido os tanques enxerga como um revés e se distancia momentaneamente do projeto. Os pesquisadores também sentem o momento. A bolsista de graduação, uma das peças-chave no desenvolvimento do projeto, consegue uma oportunidade de realizar um intercâmbio de dois meses e decide por se afastar do projeto no período. Com isso, após o teste em campo que ocorreu em 2018, o projeto enxerga a necessidade de novos recursos para conseguir avançar.

Após a experiência com o programa de aceleração, os pesquisadores começaram a se interessar mais por conhecimentos das áreas e outros programas de conteúdo similar, além de entenderem que uma das saídas para alcançar os recursos para a continuidade da maturidade do projeto poderia vir dos aprendizados. Participaram de outras experiências ao longo de 2017, 2018 e 2019. Nesses programas, os pesquisadores conseguiram avançar em validações de caráter mercadológico para o projeto, como o interesse de empresas que causam ou podem causar impactos ambientais e organizações não governamentais que se preocupam com o tratamento de água em uma prestação de serviços de locação de um equipamento de tratamento de água, além de insumos para o tratamento e manutenções eventuais para o equipamento.

Outro aspecto identificado nesses programas para que o sucesso do projeto fosse alcançado foi o da educação da comunidade afetada, público-alvo do equipamento de tratamento de água, em conhecimentos não só com relação ao tratamento, mas com relação à sua importância para a saúde familiar e sobre a importância do cuidado ambiental. Para conseguir desenvolver essa área, a qual os pesquisadores não dominavam tecnicamente, o grupo do projeto teve auxílio de outro grupo da UFMG focado em estudos de temáticas ambientais. Através do grupo colega, o projeto teve

contato com comunidades ribeirinhas e conseguiram traçar um projeto de educação ambiental para que a usabilidade dos equipamentos fosse eficiente.

Por mais que as participações em programas de empreendedorismo estavam acontecendo, as dificuldades em avançar na maturidade do desenvolvimento da tecnologia demonstravam uma barreira muito grande para manter as pessoas focadas na pesquisa. Além da bolsista de graduação, a bolsista de mestrado deixa o projeto ao conseguir passar em um concurso. Outras pessoas também foram alocadas em outros projetos.

Fazendo avanços pequenos na maturidade de desenvolvimento tecnológico, o projeto se preparava e aguardava por uma oportunidade de recursos. Essa oportunidade chegou em 2020. Em outubro, a UFMG e outras instituições do Estado lançaram um edital de subvenção econômica focado em Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e Enfrentamento à Pandemia da COVID-19¹⁶. O grupo de pesquisa decidiu que deveria submeter e foi contemplado em 2021 com aproximadamente 90 mil reais.

A partir desse momento, o projeto de pesquisa ganhou novo fôlego e possibilidade de avanço em maturidade. A pesquisadora bolsista de graduação, que havia saído de intercâmbio e estava responsável por outro projeto, volta a se dedicar de forma parcial à pesquisa, em conjunto com outra professora que assume a coordenação do projeto em questão. O grupo contratou novos bolsistas e passou a concentrar os esforços na aprovação de compra dentro do âmbito do edital dos materiais necessários para a construção do novo protótipo. Dentro do processo de desenvolvimento do protótipo, os pesquisadores entenderam que deveriam também, além de construir o protótipo cônico com agitação mecânica por pás de 1000L, construir protótipos com as mesmas características técnicas de 50L e 100L. O aprendizado da experiência com o teste de 1000L anterior os levou a acreditar que o teste em escalas menores simultaneamente pode trazer aprendizados relevantes para alcançar o produto final.

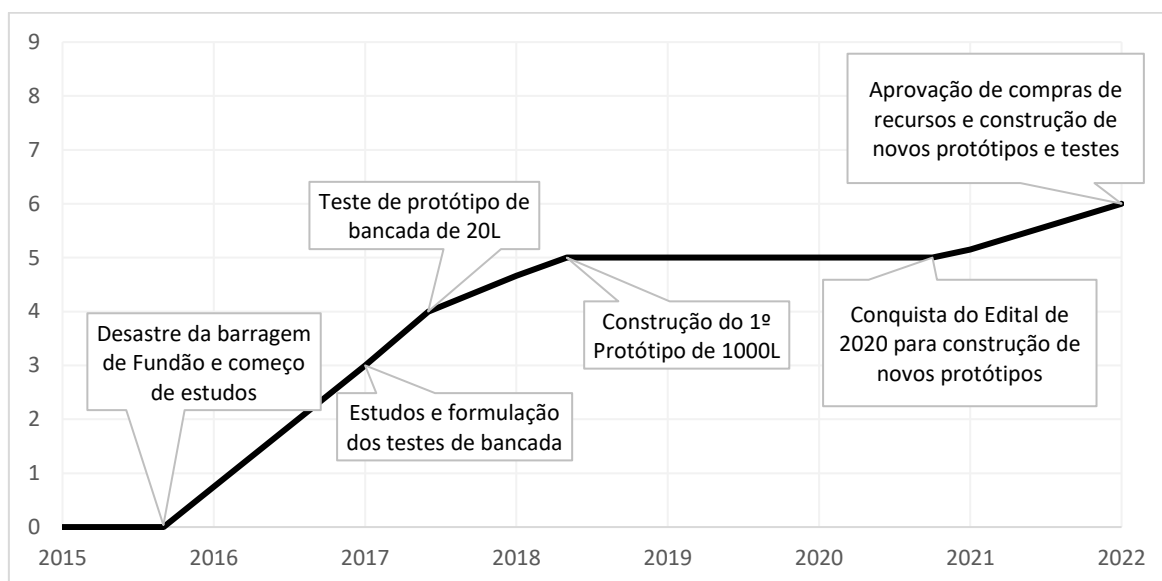
O grupo conseguiu terminar os protótipos em meados de 2022 e começou os testes de campo com os equipamentos em comunidades ribeirinhas.

¹⁶ Edital No. 01/2020 - Fomento a projetos Interinstitucionais de extensão em interface com a pesquisa para promoção dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) e enfrentamento à pandemia da COVID-19. Disponível em: <https://www.ufmg.br/proex/wp-content/uploads/2021/12/EDITAL-01_2020_IFMF_UFMG_UFOP_UFV.pdf>. Acesso em: <22/10/2022>

5.4. Análise: Produto de tratamento de água

Já para o caso do produto de tratamento de água, a Figura 14 ilustra, na perspectiva do autor baseada no estudo de caso apontado, o desenvolvimento do produto, segundo a escala de prontidão tecnológica ao longo dos anos de maturidade da tecnologia.

Figura 14: TRL Caso Produto de Tratamento de água



Fonte: Elaborada pelo autor

A pesquisa inicia-se a partir de um desastre ambiental que serve como motivação para o grupo de pesquisa direcionar suas atividades para tentar auxiliar a sociedade impactada. Os pesquisadores envolvidos no projeto começam a ter disponível tempo de pesquisa para seguir com ideias tecnológicas para solucionar o problema.

Os avanços de pesquisa bibliográfica, para validações das características e técnicas, testes das mesmas e realização do primeiro protótipo de pequena escala acontecem com os recursos que o próprio grupo de pesquisa já possuía. O processo que ocorreu foi de realocação desses recursos para avançar na maturidade do projeto de tratamento de água. Nesse processo, o avanço do TRL de 1 a TRL 4, onde ocorreu a validação em ambiente de laboratório, aconteceu com uma constância possibilitada pela disponibilidade dos recursos.

Em seguida, quando o desafio foi o de começar a validar as técnicas aplicadas em ambiente relevante, a disponibilidade de recurso do próprio grupo não possibilitava o

começo imediato dos testes necessários para a validação. Nesse sentido, foi necessário buscar alternativas diferentes para os recursos necessários aos testes. Nessa busca, o fato de os pesquisadores do grupo já possuírem conexões com o mercado de outras pesquisas e tecnologias que avançaram em maturidade facilitou. O grupo conseguiu um parceiro comercial da indústria de insumos químicos que cede mão de obra, matéria-prima e infraestrutura para o desenvolvimento do protótipo de 1000L.

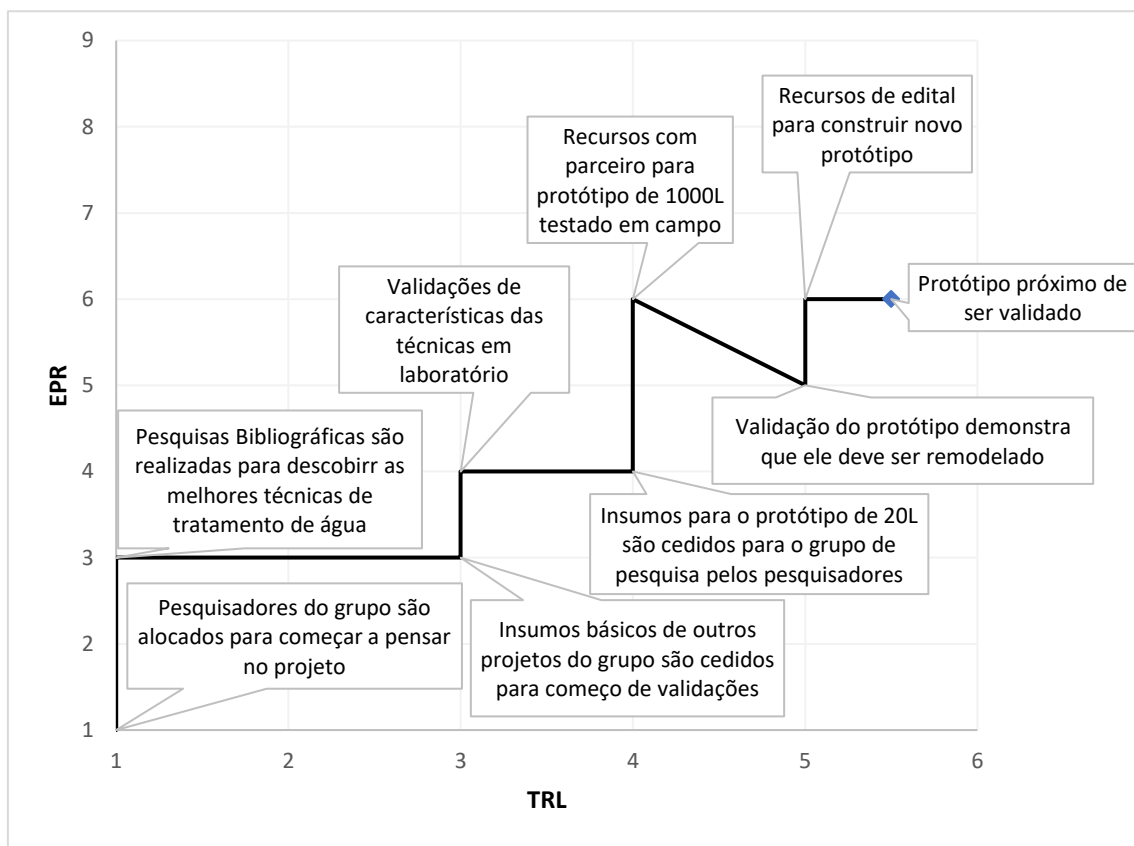
Durante os testes do 1º protótipo de 1000L os resultados dos testes referentes às técnicas utilizadas demonstraram que seria necessária a utilização de novas técnicas para que o produto pudesse realizar com sucesso o que se propunha. Com isso, seria necessário obter novos recursos para a construção de protótipos que pudessem aplicar as técnicas novas.

A partir desse ponto, a necessidade de recursos para o avanço da maturidade tecnológica demonstrou-se uma grande barreira ao projeto. O parceiro comercial que havia cedido os recursos para o desenvolvimento de protótipo não investiria os recursos no desenvolvimento do novo protótipo. O grupo precisava buscar uma nova alternativa para construção do protótipo e validar todas as técnicas utilizadas em um ambiente relevante.

O grupo continuou na busca do recurso até que em 2021 conseguiu capital financeiro através de um edital do MPT com UFMG, UFV, UFOP, IFMG-MG que possibilitou a aquisição dos materiais para a construção do protótipo e, posteriormente, os testes do protótipo pensado.

A Figura 16 demonstra os caminhos dos pesquisadores de conquista de recursos para o avanço da maturidade tecnológica.

Figura 15: TRL e EPR para o produto de tratamento de água



Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando a trajetória do produto e as captações de recurso em relação à Escala de Prontidão Tecnológica, os movimentos demonstram que o primeiro passo realizado foi a alocação de pesquisadores para começar a pensar o projeto. Nesse instante o nível de recursos alcançados permite o avanço ao TRL 1.

Com a revisão bibliográfica pronta, o projeto de tratamento de água recebe do laboratório e de outros projetos de pesquisa financiados do mesmo grupo de estudos os recursos para que pudesse avançar até o nível 3 de maturidade na Escala de Prontidão Tecnológica. Esses recursos necessários eram de infraestrutura laboratorial tradicional em laboratórios de química, tal como alguns insumos para a realização dos testes. Alguns testes pensados inicialmente não seriam contemplados pelos equipamentos ou recursos disponíveis no laboratório. Por essa razão, esses testes foram substituídos para testes que estivessem disponíveis, sem prejudicar a qualidade da pesquisa.

Os pesquisadores conseguiram validar em laboratório as técnicas que haviam sido estudadas e planejadas, estando prontos para partir para um primeiro protótipo em

pequena escala para ser validado, o que representaria a TRL 4. Para isso, precisaram que o grupo de pesquisa e o laboratório alocasse mais recursos, mas da mesma característica e de ordem de grandeza similar ao necessário para o avanço da TRL 1 até a TRL 3.

Com os recursos, o protótipo de 20L foi construído a partir das técnicas que haviam sido validadas. Os testes realizados com o protótipo foram bem-sucedidos, habilitando os pesquisadores a uma nova etapa de desenvolvimento da pesquisa. Para essa etapa, os recursos do laboratório já não seriam suficientes para o avanço da maturidade do projeto.

Nesse contexto, os pesquisadores recorrem a um parceiro comercial que já estava conectado ao grupo de pesquisa, facilitando a abertura e a liberação de recursos para o desenvolvimento do projeto. Entretanto, o parceiro comercial enxergava valor financeiro no projeto, alocando expectativas de retorno financeiro futuro no processo de decisão de liberação de seus recursos. Essa influência foi um dos fatores para que a ideia de validação passasse de 20L para 1000L, um salto significativo, mas importante para uma potencial aceleração no processo de chegada ao mercado do produto e eventual retorno financeiro ao parceiro comercial. Também é importante ressaltar que a parceria foi de cunho tácito, baseada na confiança e relação já construída pelo grupo de pesquisa em trabalhos anteriores.

Com isso, a liberação de recursos elevou a expectativa e trouxe o projeto para um potencial de alcance na Escala de Prontidão Tecnológica de Nível 6. Ao concluir o protótipo de 1000L e levá-lo para teste, o grupo de pesquisa conseguiu algumas validações e informações importantes para o sucesso do produto, mas entenderam que o protótipo naquele formato não seria exitoso, algumas técnicas precisariam ser modificadas, além do próprio desenho do protótipo. Com a realização dos testes, os pesquisadores descobriram que não chegaram em um estágio de um protótipo validado em ambiente relevante (TRL 6), mas sim o de técnicas validadas em ambiente relevante (TRL 5). Essa quebra de expectativa de alcance de maturidade demonstrou-se um revés importante à pesquisa. O agente que liberou recursos se afastou do projeto, não liberando mais recursos para a realização do novo protótipo. Com a notícias, alguns pesquisadores que estavam dedicados ao projeto se distanciaram, concentrando energia em outras atividades. Com isso, o projeto entrou em um estado de “Hiato”, aguardando um potencial novo agente liberar recursos para

a construção do novo protótipo. Como os próprios pesquisadores não estavam se dedicando com o mesmo afinco que outrora, o processo de busca por recursos foi ainda mais prolongado.

Em 2020, um edital para subvenção de pesquisas do MPT com UFMG, UFV, UFOP, IFMG-MG foi aberto focado em projetos relacionados à pandemia de covid-19 e às ODS. O grupo de pesquisa tomou conhecimento desse edital por estarem trabalhando com pesquisas em uma das áreas contempladas. Ao perceber que o edital poderia se encaixar com o projeto de tratamento de água, os pesquisadores alocaram novamente energia para tentar alcançar o recurso para o protótipo. O grupo foi felizmente contemplado no edital e voltou ao desenvolvimento da pesquisa onde havia estacionado.

Com os aprendizados técnicos obtidos com os testes do protótipo anterior, aliada a experiência anterior que ensinou os pesquisadores a não apostar todas as fichas em uma só cartada, os pesquisadores submeteram não somente a construção de um protótipo de 1000L com o novo desenho anterior, mas também protótipos intermediários de 100L e 50L para conseguirem extrair o máximo possível da experiência e dos recursos que haviam sido ofertados.

O estágio atual da pesquisa é o da realização dos testes dos protótipos em campo. Os protótipos nos 3 volumes já foram finalizados e estão sendo testados.

6. DISCUSSÃO FINAL

Ao analisar os casos estudados nesta dissertação, algumas discussões sob a luz das hipóteses elencadas neste trabalho acerca do processo de desenvolvimento das pesquisas até alcançarem sua maturidade são levantadas.

Nesse capítulo serão trabalhadas as duas hipóteses e, em seguida, percepções gerais sobre a pesquisa e sugestões de novas discussões que devem ser abordadas em trabalhos futuros acerca do tema.

6.1. Primeira Hipótese

A primeira hipótese construída foi a de que alcançar um determinado nível de recursos seria determinante para o avanço na maturidade de desenvolvimento tecnológico. Essa hipótese foi observada como verdade nos casos estudados. Alcançar os recursos tanto para o nanoscópio quanto para o equipamento de tratamento de água demonstrou-se essencial para que fosse possível uma continuidade das pesquisas.

No caso do nanoscópio, a liberação dos equipamentos e conhecimentos, aliada ao financiamento público de editais possibilita o primeiro momento de desenvolvimento da pesquisa em solo nacional. Posteriormente, a constante conquista de recursos durante o quarto e quinto nível da TRL foi o que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa até o ponto de alcançar a liberação de recursos financeiros do Estado, que também foi o que possibilitou a pesquisa avançar no desenvolvimento até o oitavo nível da Escala.

No caso do tratamento de água, o laboratório e professores com trabalhos reconhecidos anteriormente foram os responsáveis por ceder recursos outrora adquiridos para o começo do desenvolvimento da pesquisa. Assim que a necessidade de recursos excedeu a capacidade do laboratório, a pesquisa necessitou buscar apoio de parceiros para conseguir os recursos e avançar. Após o desenvolvimento com os recursos cedidos pelo parceiro, foram necessários mais recursos para o avanço. O hiato e a espera do laboratório por alguma alternativa deixam evidente a necessidade do mesmo para o avanço da maturidade tecnológica.

Outros dois pontos são evidenciados com relação à maturidade tecnológica e à necessidade de recursos. Não é trivial para pesquisadores ou agentes que

disponibilizam recursos determinar qual seria o nível de maturidade exato de uma pesquisa no momento. A percepção dos agentes é que o nível de maturidade é, mais fluído, sendo algo mais próximo a determinação avaliativa ligada aos níveis sobrepostos propostos por Mankins (2009a) como visto na Figura 1.

Também se nota que, da mesma forma que a determinação do nível de maturidade tecnológica é percebida com sobreposições de níveis, a necessidade de recursos para avançar também não aparentou ser determinística nos casos estudados. O observado foi que os saltos de recursos e de desenvolvimento foram, em alguns pontos de desenvolvimento da Escala de Prontidão Tecnológica, maiores do que o desenvolvimento linear de nível a nível.

Por fim, notou-se que não foi possível determinar especificamente durante a análise dos casos qual seria a quantidade de recursos ou o tipo de recursos necessário para cada um dos níveis da TRL com simetria entre ambos. O que ficou evidente foi que os recursos seriam extremamente dependentes da área de conhecimento, do contexto da pesquisa e das pessoas envolvidas.

6.2. Segunda Hipótese

Já com relação à segunda hipótese formulada, o agente que libera o recurso e sua respectiva forma de avaliação para liberação é determinante para o recebimento dos recursos necessários para o avanço na maturidade de desenvolvimento tecnológico. A hipótese também foi observada nos casos estudados.

Na jornada de pesquisa do nanoscópio, três perfis de agentes foram responsáveis pela liberação dos recursos. O primeiro é o perfil de pesquisador que adotou critérios tecnológicos e científicos para liberar os recursos para o começo do desenvolvimento do produto. Os méritos acadêmicos científicos e a capacidade de desenvolver uma pesquisa científica que poderia ser complementar aos conhecimentos científicos do pesquisador estrangeiro foi o que atraiu e motivou a cessão de equipamentos e do conhecimento da pesquisa até aquele momento.

O segundo perfil de agente foi o Estado. Em um primeiro momento, a liberação de recursos do Estado utilizou também critérios tecnológicos e científicos, através da análise do mérito acadêmico tipicamente feita em editais de subvenção econômica.

Com o avanço da maturidade tecnológica, outros atores do Estado cederam recursos à pesquisa. O aspecto principal analisado pelo Estado para as seguintes liberações de recurso também estava ligado principalmente a méritos acadêmicos e da tecnologia, mas começam a levar em consideração aspectos mercadológicos, até o limite dos últimos recebimentos de recursos financeiros do Estado levarem em consideração a possibilidade do desenvolvimento mercadológico do produto trazer externalidades ao desenvolvimento econômico do estado de Minas Gerais.

Por último, o agente privado investidor de capital de risco, para liberação de recursos já incorpora os aspectos e processos de avaliação e tomada de decisão da indústria, o qual está inserido. Nessa indústria, o fator predominante é a análise de risco e retorno baseada em uma carteira de ativos investidos, o qual o investidor possui habilidades e conhecimentos para auxiliar no crescimento empresarial (TYEBJEE, 1984). Para esse processo, o principal fator analisado pelo investidor de risco ao investir na então empresa que desenvolve o nanoscópio foi o vislumbre de altos retornos financeiros dado o desenvolvimento empresarial do ativo investido. Também é notório nesse processo que o *venture capitalist* possuía habilidades específicas para auxiliar o crescimento empresarial em áreas de conhecimento tecnológico denso, utilizando, portanto, aspectos acadêmicos e tecnológicos em seu processo de análise que em outras empresas de capital de risco não seriam usualmente vistos, dada a sua especificidade.

No caso do equipamento para tratamento de água também pode-se observar os três atores do último caso como responsáveis por disponibilizar recursos para o desenvolvimento da pesquisa – os pesquisadores, o Estado e o setor privado.

Os primeiros agentes a liberar recurso para o produto foram os pesquisadores e professores por meio do laboratório e de recursos que haviam sido adquiridos de variadas formas para o desenvolvimento de pesquisas no âmbito da área de conhecimento do grupo. Para essa liberação de recursos, que foi majoritariamente de mão de obra de pesquisa e de matéria prima laboratorial e que foi adquirida em maior parte com recurso público, os agentes utilizaram critérios ligados à curiosidade acadêmica e desafio técnico relevantes conectados aos objetivos do grupo.

O segundo agente a liberar recursos, no caso do equipamento para tratamento de água, foi o setor privado representado por um parceiro comercial. O parceiro, de uma

indústria química, não cede recursos financeiros, mas mão de obra especializada, equipamentos e matéria prima para construção de protótipo. Para isso, o agente fez uma avaliação de possibilidade de retorno financeiro com um baixo risco e baixo investimento de recursos, em uma ideia parecida à dos investidores de capital de risco. No caso, era mais relevante dada a consciência do empresário de que precisava inovar para manter o seu negócio pujante e crescendo, mas que não possuía internamente os recursos humanos necessários para tal atividade. Era por isso que havia se aproximado do grupo anteriormente, o que gerou a conexão necessária para o investimento no equipamento tratado no estudo de caso.

Porém, o investimento de recurso do parceiro veio com uma expectativa de entrega de desenvolvimento do produto com possibilidade de chegar ao mercado e ser comercializado o mais rápido possível. Nesse processo, acelerou-se a produção de um protótipo com escala o mais próximo possível para um produto que chegaria ao mercado. Com os testes técnicos, porém, os pesquisadores entenderam que o protótipo conforme estava ainda precisava de melhorias de desenvolvimento para chegar ao mercado. Isso quebra a expectativa de rápido desenvolvimento colocada pelo parceiro comercial ao liberar o recurso e se afasta do projeto antes dele chegar ao mercado.

O próximo agente foi, após algum tempo, o Estado. Um edital de subvenção de caráter público, com os processos de avaliação para liberação de recursos baseados no mérito acadêmico e do desenvolvimento tecnológico relacionado aos ODS, foi lançado e a equipe de pesquisa foi contemplada.

6.3. Percepções gerais

O que foi percebido com os estudos de caso é que os atores Universidade, Estado e agente privado foram os responsáveis pela liberação de recursos, possibilitando a evolução da pesquisa até os estágios atuais. O primeiro agente nos dois casos foi representantes relacionados à Universidade e para liberação de recursos, eles utilizaram aspectos de desenvolvimento tecnológico e científico. Também se notou que a quantidade de recursos investidos nos primeiros níveis de desenvolvimento foi menor do que os recursos investidos pelos atores em outros níveis da TRL.

Para as etapas do meio da Escala de Prontidão Tecnológica, tanto o Estado quanto o agente privado participaram nos casos. O ator do Estado em ambos os casos adotou critérios avaliativos ligados ao desenvolvimento tecnológico, entretanto quanto maior o desenvolvimento e o nível da TRL do produto, mais o Estado começou a utilizar análises ligadas ao retorno financeiro. No caso do agente privado, que utilizou a lógica de risco e retorno, percebeu-se que ela havia gerado uma expectativa de retorno maior do que o desenvolvimento tecnológico permitia no momento, gerando quebra de expectativa e fazendo com que o desenvolvimento do equipamento só voltasse a acontecer após a conquista do recurso do Estado. Outro ponto relevante notado para as etapas do meio da TRL é que a necessidade de recurso para avançar no desenvolvimento tecnológico foi consideravelmente maior que as outras, corroborando com a Figura 8 onde a maior dificuldade e quantidade de componentes totais e complexos se encontravam nas etapas intermediárias da Escala.

O estudo de caso abordado que chegou até as etapas de desenvolvimento na TRL mais avançada recebeu recursos privados, com a lógica de risco e retorno de investidores de risco. Nesse caso, a análise baseada na competência acadêmica e tecnológica ocorre dado a especificidade do investidor, mas usualmente o aspecto analisado por outros investidores de risco seria extremamente voltado ao retorno financeiro.

A tendência percebida através dos casos é de que ao avançar nos níveis da Escala de Prontidão Tecnológica, quanto maior o nível, maior seria a necessidade do agente de enxergar possibilidade de retorno financeiro ao ceder o recurso e menor seria a valorização do conhecimento acadêmico. Ao contrário, quanto menor o nível na TRL, maior a necessidade de demonstrar conhecimento acadêmico e capacidade de desenvolvimento tecnológico e menor a exigência de demonstração de possibilidade de retorno financeiro. No estudo também se infere que o Estado, nos estágios intermediários da Escala é o agente que mais disponibiliza recursos para o desenvolvimento tecnológico.

O investimento privado nos estágios intermediários da TRL para o equipamento de tratamento de água pode demonstrar uma armadilha relacionada à avaliação de retorno financeiro em estágios de menor desenvolvimento tecnológico.

Essa armadilha está relacionada a expectativas infladas do agente investidor com relação a ganhos financeiros de uma tecnologia. No caso, ficou constatado essa relação no momento que o investidor privado demonstrou impaciência quando a pesquisa enfrentou percalços. Ao mesmo tempo, ele estimulou que a pesquisa tentasse avançar etapas de desenvolvimento da maneira mais rápida possível. Os dois fatores demonstram que a aceleração do processo de maturidade tecnológica em uma busca por ganhos financeiros rápidos pode prejudicar o próprio desenvolvimento da tecnologia e, contra intuitivamente atrasar os ganhos financeiros. Os pesquisadores, por sua vez, também devem se preocupar com a expectativa do agente fornecedor de recurso. O desalinhamento ou aceleração do processo de maturidade tecnológica é responsabilidade de ambos.

6.4. Novas discussões

Após as análises realizadas e as duas hipóteses terem sido validadas com os dois estudos de caso das pesquisas da UFMG, demonstrando que conseguir os recursos e quem libera o recurso são determinantes para o avanço da maturidade tecnológica, novas perguntas surgiram.

A primeira está relacionada à determinação da Escala de Prontidão de Recursos. A compreensão de que a EPR caminha lado a lado da TRL é um dos passos para elucidar o processo. ***O que determina cada um dos níveis de recursos espelhados da TRL? E quais são esses recursos para os níveis da Escala?***

Levando em consideração a referência bibliográfica levantada, a complexidade dos casos de desenvolvimento torna as experiências únicas, o que por sua vez, torna a tarefa de avaliação de níveis de maturidade tecnológica desafiadora (OLECHOWSKI *et al.*, 2020) e, conseqüentemente, é igualmente desafiador avaliar uma Escala de Prontidão de Recursos.

Uma terceira questão também está atrelada à dificuldade de avaliação. Se é difícil avaliar o nível da TRL de uma tecnologia específica, a utilização de limites de níveis da Escala de Prontidão Tecnológica específicos como critérios classificatórios ou, ainda pior, eliminatórios, de seleção de projetos para receberem recursos públicos provenientes de editais se torna perigosa. Nesse sentido, tanto a avaliação do

candidato ao edital do nível que se encontra, quanto a do avaliador podem distanciar o processo seletivo do real objetivo de seleção do edital.

Esse ponto é ainda mais relevante quando as políticas de inovação nacionais estão direcionadas a utilizarem uma ferramenta baseada na TRL no âmbito do MCTI. Ainda, se o direcionamento de que o processo de avaliação e aquisição de recursos é crucial para o crescimento dos níveis de maturidade tecnológica, como vimos nos casos estudados neste presente trabalho, uma avaliação imprecisa pode ser determinante para o sucesso ou não de uma nova tecnologia.

Ainda sobre a avaliação, Mankins (2009a) quando demonstra a Escala de Prontidão Tecnológica através de sua figura de termômetro já conhecida na literatura, demonstra que para determinados níveis dentro da TRL existem definições de maturidade coexistentes. Para o objetivo de avaliação e evitar seleções equivocadas de casos para receber financiamentos, as determinações de Pesquisa básica (TRL 1 e 2), Pesquisa para provar viabilidade (TRL 2, 3 e 4), Desenvolvimento tecnológico (TRL 3, 4, 5 e 6), Demonstração tecnológica (TRL 5, 6 e 7), Desenvolvimento de Sistema (TRL 6, 7, 8 e 9) e Desenvolvimento, teste e operação de Sistema (TRL 8 e 9) podem ser mais assertivos do que a determinação específica de um Nível dentro da Escala.

Por fim, um último ponto a elucidar está entrelaçado a uma percepção de valor dos agentes envolvidos no processo de desenvolvimento tecnológico. Para essa explicação, serão utilizadas as ideias de valor financeiro e valor social. Valor financeiro estaria atrelado aos recursos financeiros e a capacidade de se fazer dinheiro. Quanto mais dinheiro for possível fazer com uma determinada tecnologia, por exemplo, maior será o valor financeiro que ela pode trazer.

Já o valor social entra em outro processo de conceitualização de valor como forma de melhorar a qualidade do viver (PIGA, 2021). Individualmente se pode melhorar a qualidade do viver quando algo entrega as necessidades de um ser humano como comer, respirar e sentir (GOERGEN, 2005). Algo teria valor social, então, quando conseguisse entregar as necessidades individuais para todo ou o máximo possível do coletivo de indivíduos em uma sociedade. Quanto maior o nível de necessidade e de indivíduos sendo cobertos, maior seria o valor social.

Com essas definições, o que pode ser observado nessa ótica dentro dos casos estudados foram as seguintes situações. Quando o agente que disponibiliza os

recursos está alinhado com as percepções de valor social e valor financeiro dos agentes de pesquisa, os recursos são liberados e há diálogo entre os atores.

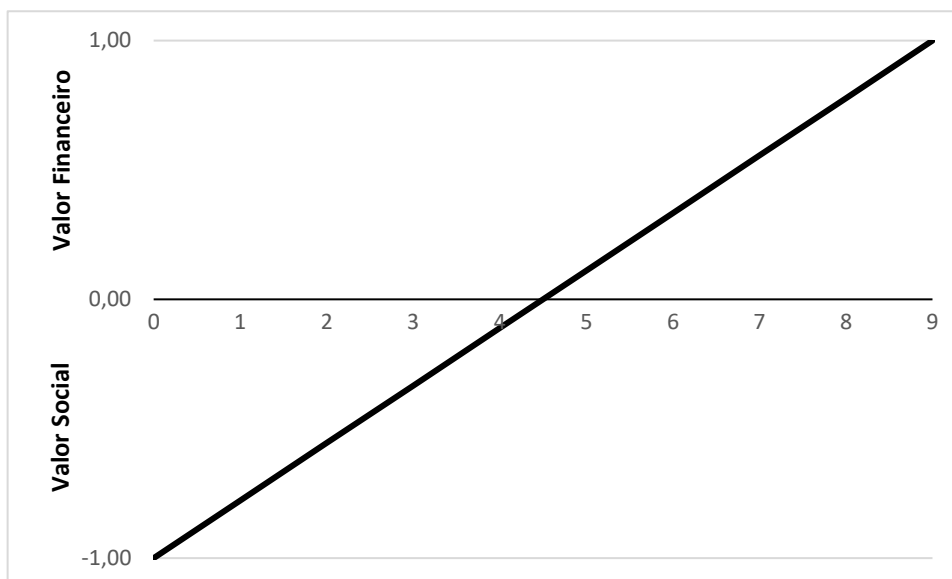
Os critérios de valor dos agentes que disponibilizam recursos geralmente estão estritamente alinhados com seus métodos de avaliação. Dito isso, os agentes de pesquisa precisam se alinhar aos valores dos agentes financiadores para conseguirem seus recursos liberados. Esse processo de alinhamento, dependendo da tecnologia e o seu potencial não é trivial. O desenvolvimento da maturidade tecnológica pode estar direcionado muito mais ao valor financeiro, como é o caso, por exemplo, de algoritmos para definição dos múltiplos em casas de aposta; ou podem estar muito mais direcionados ao valor social, como é o caso de pesquisas que buscam a cura para doenças negligenciadas.

Outra discussão importante dentro do assunto é o direcionamento do desenvolvimento tecnológico baseado na percepção de valor dos agentes financiadores acessíveis e disponíveis àquela pesquisa. No caso da tecnologia para tratamento de água, o valor do financiador entre os TRL 3 e 5 aparentemente era mais financeiro do que o caráter da pesquisa no momento. Isso fez com que a pesquisa tentasse se encaixar no perfil do financiador, tentando trazer mais velocidade, facilidade e baixo custo para a solução (com potenciais de trazer mais recursos financeiros o mais rápido possível).

Nesses exemplos, uma maior percepção de valor social por parte dos agentes financiadores pode ter maior aderência ao processo de desenvolvimento de maturidade de uma nova tecnologia, permitindo que todas as etapas dos métodos científico e de desenvolvimento sejam cumpridas.

Ainda, torna-se relevante a discussão sobre a percepção de valor social e financeiros dos agentes financiadores. Aparentemente, quanto maior o nível da TRL, os agentes que disponibilizam recursos tendem a olhar mais o valor financeiro do que o valor social. Da mesma forma, nos níveis menores de maturidade tecnológica, os valores sociais são mais utilizados como critérios de avaliação dos que os valores financeiros. A Figura 18 abaixo pode ilustrar o processo.

Figura 16: Valor social e financeiro percebido pelos agentes financiadores



Fonte: Elaborado pelo autor

Logo, se a sociedade almeja mais tecnologias pregando mais valor social e se agentes financiadores que pregam mais valor social de fato conseguirem permitir maiores avanços de maturidade tecnológica dentro do processo e método científico, a pergunta que deve ser feita é a de como fazer com que os agentes financiadores ***percebam mais valor social do que financeiro, como fazer processos de avaliação e seleção com mais critérios baseados em valores sociais e como criar métricas de sucesso mais ligadas aos valores sociais.***

7. CONCLUSÃO

A elaboração de uma ideia de pesquisa não é tarefa trivial. Tão pouco o processo de transformá-la de fato em um produto. O presente trabalho elucidou através de dois estudos de caso de pesquisas que trilharam o caminho de desenvolvimento tecnológico na Universidade Federal de Minas Gerais com a intenção de compreender melhor e acrescentar à literatura novos aprendizados com relação ao desafio de transformar uma pesquisa em produto.

Sob a perspectiva da Escala de Prontidão Tecnológica como uma ferramenta capaz de auxiliar na identificação do estágio de desenvolvimento e nível de maturidade de uma pesquisa, os casos foram explorados. Na literatura pode-se compreender que os estudos sobre a TRL estão se aprofundando ao longo dos anos e a partir disso novas contribuições estão surgindo. Novas Escalas como as Escala de Maturidade Comercial (MRL) e a Escala de Maturidade Regulatória (RRL) despontaram na academia como alternativas para a avaliação de outros critérios necessários a uma tecnologia chegar de fato a transformar-se em um produto.

Formas de avaliação também foram desenvolvidas com o objetivo de facilitar as identificações dos níveis de maturidade tecnológica em que uma tecnologia se encontra. A TRA e R&D³ são exemplos que, desenvolvidos no berço de criação da Escala de Prontidão Tecnológica, sistematizam um esforço avaliativo da tecnologia não só nos aspectos de desenvolvimento, mas também no nível de risco ao se gastar recursos para desenvolver uma pesquisa em particular, tal como o grau de dificuldade para se alcançar uma nova etapa dentro da TRL.

Ainda assim, a TRL apresenta dificuldades e desafios na sua aplicação sistemática, como demonstrado por Olechowski *et al.* (2020). Os maiores desafios estariam relacionados ao processo avaliativo complexo, a especificidade da Escala em tecnologias espaciais, e a falta de incorporação de outros fatores importantes para o processo de desenvolvimento de maturidade da pesquisa, como a dificuldade e o nível de recursos necessários para atingir um novo patamar.

Não obstante, a TRL representa uma maneira simples e disseminada de determinar um estágio de desenvolvimento de uma pesquisa e por isso vem sendo utilizada em vários países como ferramenta propulsora de inovação. A Escala vem sendo estudada, por exemplo, no contexto de enfrentamento ao Vale da Morte das

tecnologias e das novas empresas. Nesse sentido, identificar em qual estágio de maturidade está a maior lacuna de distribuição de recursos financeiros possui relevância na conquista de pesquisas em estágios de maturidade mais avançados. Os indícios na literatura mostram que são nos níveis da TRL entre 3 e 6 que existem as maiores lacunas de financiamento

As políticas de inovação de vários países também absorveram a TRL e, entendendo a lacuna do Vale da Morte, iniciaram esforços de direcionamento de recursos, observando a maturidade tecnológica e a maior carência de capital. Nos EUA e na Europa, políticas de inovação, sobretudo de investimento dos departamentos de segurança utilizam a Escala de Prontidão Tecnológica como parâmetro para a seleção de projetos. No Brasil, alguns atores de financiamento do Estado já passaram a adotar a TRL, como a Embrapii, Finep e o MCTI. O último propôs para os anos vindouros uma portaria que estabelece uma Calculadora de Maturidade Tecnológica como padrão de avaliação de estágio de desenvolvimento das tecnologias que serão financiadas dentro das políticas de investimento e inovação da instituição.

Para analisar os casos, em seguida, utilizou-se da Escala de Prontidão Tecnológica, aliada às metodologias de estudo de caso na busca de compreender sobre o processo que levou as iniciativas a se desenvolverem e alçarem níveis mais elevados na TRL. Dados os entendimentos sobre as deficiências da Escala, o problema foco do trabalho foi a questão dos recursos aliada à maturidade tecnológica. A percepção que fica é a de que para alcançar um nível na Escala de Prontidão Tecnológica, é necessário alcançar um nível de recursos, sejam eles de quaisquer naturezas, compatíveis com os desafios que devem ser encontrados no nível de maturidade da TRL. Com isso, existiria uma Escala de Prontidão de Recursos (EPR), espelhada à TRL que precisa ser considerada para que uma pesquisa avance em maturidade tecnológica.

Dada a EPR, as hipóteses foram construídas. A primeira hipótese seria a de validar a existência da Escala de Prontidão de Recursos tal como descrita, onde o alcance de um determinado nível de recursos seria determinante para o avanço na TRL. A segunda hipótese, relacionada ao agente que libera recursos, seria a de que este e a sua forma de avaliação é determinante para o recebimento dos recursos e para o avanço na maturidade na TRL.

A partir das análises dos casos, ambas as hipóteses foram confirmadas. De fato, os recursos precisavam ser conquistados anteriormente de começar um desenvolvimento e se alcançar um nível maior na TRL. Além disso, os agentes financiadores e seus critérios de financiamento se demonstraram determinantes para o avanço na Escala de Prontidão Tecnológica. Um agente privado, ou agente de Estado ou ICT tinham formas diferentes de avaliar e cobrar resultados dos pesquisadores desenvolvendo a pesquisa. Em casos que no mesmo nível agentes diferentes disponibilizaram os recursos, estímulos, facilidades e dificuldades diferentes ficaram claras e integraram os desafios para se avançar no desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, o trabalho traz novos pontos para serem explorados posteriormente. Um primeiro seria uma melhor determinação do que são cada um dos níveis na EPR e quais seriam os recursos necessários para alcançar novos níveis na TRL. Outro ponto seria apresentar maneiras claras para a avaliação de cada nível dentro da Escala de Prontidão de Recursos. Além disso, levanta-se a questão da utilização da TRL como critério de seleção em Editais de financiamento, já que existem dificuldades em se realizar a avaliação e ser assertivo na mesma. Para esse ponto, se propõe que poderia ser utilizado ao invés dos 9 níveis determinísticos, formas de determinações mais amplas onde coexistem níveis de maturidade na Escala de Prontidão Tecnológica.

Outra questão, igualmente ou mais relevante, estaria atrelada à percepção de valor dos agentes liberadores de recursos. Dividindo os tipos de valores de maneira simplificada entre valor financeiro e valor social, fica nítida a necessidade de alinhamento de valores entre os agentes financiadores e os pesquisadores, além de um maior compromisso com os critérios de avaliação e de acompanhamentos relacionados aos valores sociais.

REFERENCIAL TEÓRICO

ARAÚJO, Maria Goretti Falcão et al. Perspectiva em transferência de biotecnologia no Brasil em ICT: caso de uma "Spin-off" na região da Amazônia brasileira: Perspective on biotechnology transfer in Brazil in ICT: case of a " Spin-off" in the brazilian Amazon Region. Brazilian Journal of Development, 2022.

ASCHHOFF, Birgit et al. European competitiveness in key enabling technologies. Centre for European Economic Research (ZEW), Mannheim, Germany, 2010.

BILBRO, James W. Using the Advancement Degree of Difficulty (AD2) as an input to Risk Management. JB CONSULTING INTERNATIONAL HUNTSVILLE AL, 2008.

CHANG, Wen-bing et al. Technology research & development decision based on Relative Advancement Degree of Difficulty in Large Project. In: The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC). IEEE, 2014. p. 2267-2271.

DENT, David; PETTIT, B. Technology and market readiness levels. Dent Associates, 2011.

EMBRAPII. Manual de operação das unidades Embrapii. Brasília: Embrapii, 2020. Disponível em: https://embrapii.org.br/wp-content/images/2020/04/Manual_EMBRAPII_UE_versa%CC%83o_6.0-de-20.10.20.pdf. Acesso em: 26 de setembro de 2022.

FAÇANHA, Luis Otávio; RODRIGUES, Denise A.; DIAS, Antonio José R. Financiamentos públicos para projetos de pesquisa e desenvolvimento: uma experiência de avaliação na Finep. 1989.

FERREIRA, Cristiano Vasconcellos; BIESEK, Fernando Luiz; SCALICE, Régis Kovacs. Product innovation management model based on manufacturing readiness level (MRL), design for manufacturing and assembly (DFMA) and technology readiness level (TRL). Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 43, n. 7, p. 1-18, 2021.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GOERGEN, Pedro. Educação e valores no mundo contemporâneo. Educação & Sociedade, v. 26, p. 983-1011, 2005.

HASENAUER, Rainer; GSCHÖPF, Andreas; WEBER, Charles. Technology readiness, market readiness and the triple bottom line: An empirical analysis of innovating startups in an incubator. In: 2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). IEEE, 2016. p. 1387-1428.

KASPER, Alice Goulart. Plano de desenvolvimento e inovação da indústria química: análise dos critérios de seleção do BNDES. 2018.

LAURIANO, Nayara Gonçalves. A transformação do conhecimento de base científica em inovação: condições e contradições de uma spin-off acadêmica. 2020.

LIMA, Larisse Araújo et al. Desenvolvimento Tecnológico e a Maturidade das Pesquisas no Âmbito das Instituições de Pesquisa Científica e Tecnológica (ICT) no Brasil. Cadernos de Prospecção, v. 12, n. 1, p. 31-31, 2019.

MANKINS, John C. et al. Technology readiness levels. White Paper, April, v. 6, n. 1995, p. 1995, 1995.

MANKINS, John C. Research & development degree of difficulty (R&D3). White Paper, March, v. 10, 1998.

MANKINS, John C. Technology readiness and risk assessments: A new approach. Acta Astronautica, v. 65, n. 9-10, p. 1208-1215, 2009a.

MANKINS, John C. Technology readiness assessments: A retrospective. Acta Astronautica, v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009b.

MCCONNELL, Campbell R. et al. Economics: Principles, problems, and policies. New York: McGraw-Hill, 1987.

MURADOVICH, B. M. Conceptual aspects of marketing readiness level assessment model. Global Journal of Engineering Science and Research Management, v. 4, n. 10, p. 34-44, 2017.

NAEGLE, Brad. Reducing Risk in DoD Software-Intensive Systems Development. Naval Postgraduate School Monterey United States, 2016.

NANDA, Ramana; RHODES-KROPF, Matthew. Financing risk and innovation. Management Science, v. 63, n. 4, p. 901-918, 2017.

OLECHOWSKI, Alison L. et al. Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities. *Systems Engineering*, v. 23, n. 4, p. 395-408, 2020.

OLIVIERI, Alejandro C. Analytical figures of merit: from univariate to multiway calibration. *Chemical reviews*, v. 114, n. 10, p. 5358-5378, 2014.

PAUN, Florin. 'Demand Readiness Level'(DRL): A New Tool to Hybridize Market Pull and Technology Push Approaches-Introspective Analysis of the New Trends in Technology Transfer Practices. 2011.

PIGA, Talita Ravagnã et al. O Processo de construção de valores sociais: um estudo considerando o valor social sustentabilidade. 2021.

PSACHAROPOULOS, George; WOODHALL, Maureen. *Education for development*. Oxford: Oxford University Press, 1993.

QUINTELLA, C. M. A revista caderno de prospecção e os níveis de maturidade de tecnologias (TRL). *Cadernos de Prospecção*, Salvador, 2017.

ROBERT, Y. I. N. et al. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. Porto Alegre: Bookman, 2001.

SANTIAGO, Rafael Aquino. *Captação de recursos financeiros privados por empresas nascentes de base tecnológica: estudo de múltiplos casos de empresas mineiras e paulistas*. 2011.

SARTAS, Murat et al. Scaling Readiness: Science and practice of an approach to enhance impact of research for development. *Agricultural Systems*, v. 183, p. 102874, 2020.

SILVA, Renato Luz; DE OLIVEIRA RIBEIRO, Paulo Ricardo; DE OLIVEIRA ANDRADE, Mayse. *O descaso com a política educacional no Governo Bolsonaro. Livro Políticas sociais no Governo Bolsonaro: entre descasos, retrocessos e desmontes*. CLACSO. 2022

TYEBJEE, Tyzoon T.; BRUNO, Albert V. A model of venture capitalist investment activity. *Management science*, v. 30, n. 9, p. 1051-1066, 1984.

VIK, Jostein et al. Balanced readiness level assessment (BRLa): A tool for exploring new and emerging technologies. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 169, p. 120854, 2021.

WINCE-SMITH, Deborah. Universities are Wellsprings of Innovation, Drivers of Regional Economies. *Competitive Edge*. The Global Federation of Competitiveness Councils. 2017. Disponível em: <https://blog.thegfcc.org/universities-are-wellsprings-of-innovation-drivers-of-regional-economies-8a3c097e6cc>. Acesso em: 01 de outubro de 2022.

ZANANDREZ, Lucas Fabrini Ramalho et al. Estudo comparativo do desenvolvimento de inovações em ICT'S e de produtos em empresas: o caso de uma tecnologia para o monitoramento do *Aedes aegypti*. 2020.

ZHANG, Zhenglong et al. Tip-enhanced Raman spectroscopy. 2016.

ZIDER, Bob. How venture capital works. *Harvard business review*, v. 76, n. 6, p. 131-139, 1998.