



TRILHOS NAS ESTRELAS: O PROJETO MAGLEV-COBRA À LUZ DOS
“TECHNOLOGY READINESS LEVELS” DA NASA

Luiza Maria da Silveira Lobo

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

Orientador: Roberto dos Santos Bartholo Junior

Rio de Janeiro

Junho de 2016

TRILHOS NAS ESTRELAS: O PROJETO MAGLEV-COBRA À LUZ DOS
“TECHNOLOGY READINESS LEVELS” DA NASA

Luiza Maria da Silveira Lobo

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

Examinada por:

Prof. Roberto dos Santos Bartholo Junior, Dr.

Prof. Samuel Jurkiewicz, D.Sc

Prof. Édison Renato Pereira da Silva, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2016

Lobo, Luiza Maria da Silveira

Trilhos nas estrelas: o projeto MagLev-Cobra à luz dos “Technology Readiness Levels” da Nasa/ Luiza Maria da Silveira Lobo – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XXII, 211 p.: il; 29,7 cm.

Orientador: Roberto dos Santos Bartholo Junior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 182 – 196.

1. Níveis de Prontidão de Tecnologia 2. Nasa. 3. Inovação tecnológica. 4. Projeto MagLev-Cobra. 5. Ciclo de vida do projeto. I. Bartholo Junior, Roberto dos Santos II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

A todos os professores da Coppe/UFRJ,
com admiração e respeito,
pelo desafio do exercício diário da profissão.

AGRADECIMENTOS

Em protesto às cenas deploráveis protagonizadas, no dia 17 de abril de 2016, por nossos deputados federais, no plenário da Câmara, durante a sessão de votação que aprovou a admissibilidade do processo de impedimento contra a presidente Dilma Rousseff, decidi não expressar meu voto de agradecimento “a Deus, à família e ao nosso Estado”...

Entretanto, não posso deixar passar despercebidos todos aqueles que me incentivaram a chegar até aqui. Esta dissertação representa não só meu esforço de levar a cabo um curso de pós-graduação trabalhando, mas também um marco em mais de uma década de atividades em consultoria jurídica para pesquisas e projetos nas áreas de engenharia e afins. Essa experiência foi nada menos que fenomenal!

Ao longo desses anos, aprendi, assisti e vivenciei a luta de professores, pesquisadores, funcionários técnico-administrativos e alunos no desenvolvimento de projetos de inovação tecnológica. Minha missão como consultora jurídica foi a de buscar caminhos viáveis para resolver entraves burocráticos, bem como soluções que fossem realmente capazes de ajudar a promover a pesquisa de ponta.

Por essa razão, escolhi um tema que pudesse sintetizar as lições aprendidas e, ao mesmo tempo, apresentar um estudo sobre uma ferramenta de gestão e um projeto de inovação tecnológica – *Technology Readiness Levels* e o Projeto MagLev-Cobra. Não se pretende aqui unir um ao outro ou aplicar um sobre o outro, e nem mesmo avaliar um com a régua do outro. Esse não é um estudo jurídico.

Ao contrário, ousei avançar no campo das engenharias a fim de criar um olhar diferenciado sobre o desenvolvimento de tecnologia em nosso País. O MagLev-Cobra é um exemplo entre muitos projetos de tecnologia de ponta que resultam da dedicação de diversas pessoas, as quais admiro e gostaria de agradecer. Esta dissertação é, portanto, a forma material do reconhecimento do trabalho e do caráter de indivíduos notáveis que aprendi a admirar nessa jornada.

Nesse Patamar, gostaria de agradecer ao orientador, professor Roberto dos Santos Bartholo Junior, por ter me apoiado desde o primeiro dia que ingressei no curso de mestrado, sempre me incentivando a seguir em frente. Expresso simultaneamente meu apreço pelo coordenador do Programa de Engenharia de Produção, professor

Samuel Jurkiewicz, um mago em ouvir pacientemente as queixas dos alunos e dar respostas matematicamente precisas.

Ao professor Richard Magdalena Stephan, coordenador do projeto MagLev-Cobra, agradeço por ter me guiado nas pesquisas ao longo desses anos e me proporcionado a oportunidade de assistir à construção desse projeto de inovação tecnológica. Com o coordenador, não poderia deixar de agradecer aos membros da equipe, com os quais tive o prazer de conviver e que me cederam seus preciosos tempos para que esta dissertação se concretizasse: em especial, o professor Roberto Nicolsky, fundador do Laboratório de Aplicações de Supercondutores (Lasup), e os professores Rubens de Andrade Junior, Antonio Carlos Ferreirae Elkin Ferney Rodriguez Velandia; os engenheiros Felipe dos Santos Costa, Felipe Sass, Flávio Goulart dos Reis, Guilherme Gonçalves Sotelo e Wescley Tiago Batista de Souza, assim como o pessoal técnico-administrativo Edeval Vieira Gangá, Erick Alencar de Souza, Genésio Francisco Sant'Anna, Ocione José Machado e Vina Guedes.

Agradeço também aos professores Angela Maria Cohen Uller, Carlos David Nassi, Luiz Pinguelli Rosa e Aquilino Senra Martinez, que me deram a oportunidade de prestar assistência a Fundação Coppetec e conhecer a Coppe. Sou grata também aos professores Antonio MacDowell de Figueiredo, Edson Hirokazu Watanabe, Fernando Alves Rochinha, Guilherme Horta Travassos, José Carlos Costa da Silva Pinto, Romildo Dias Toledo Filho e Segen Farid Estefen, que me aplicavam testes a cada dia de trabalho.

Não posso deixar de registrar meu muito obrigada ao corpo jurídico e ao pessoal técnico-administrativo da Fundação Coppetec, pelo suporte e pela presteza de seus serviços. E, certamente, às secretárias, em especial, Maria de Fátima Cruz Alexandre, Daniela Carnavale, Carla Souza e Ana Paula Prata, bem como aos auxiliares e estagiários, pois sem eles não conseguiria cumprir os prazos.

Some-se, ainda, minha gratidão e meu reconhecimento a todos os professores, servidores técnico-administrativos e alunos da Coppe, que fazem essa instituição ser um verdadeiro celeiro de inovações tecnológicas. À Denise Schwartz Cupollino, *in memoriam*, pelas lembranças inesquecíveis, meu eterno carinho.

Nessa mesma linha de grandeza, à gentileza dispensada por Dominique Ribeiro e todo o pessoal da assessoria de comunicação da Coppe, retribuo com estima e apreço

a inestimável ajuda na difícil tarefa de coletar e selecionar dados sobre o projeto MagLev-Cobra.

Um muito obrigada especial ao Sr. Laerte da Silva Xavier, pelas caronas, pelos ensinamentos de vida e por dividir comigo a amizade e admiração pelo ex-reitor da UFRJ, professor Luiz Renato Caldas.

Reconheço, ainda, a inspiração e o exemplo dos professores do Programa de Engenharia de Produção que, ao compartilharem conhecimentos e experiências, me fizeram refletir sobre minha vida. Estendo esse reconhecimento a todos os funcionários do Programa de Engenharia de Produção para os quais não poderia deixar de expressar minha gratidão pelo atendimento, pelo apoio e pela dedicação. Retribuo também a meus colegas do curso de mestrado, o espírito de cooperação e compartilhamento de saberes, notas de aulas, livros, material didático e experiências de vida.

Agradeço aos membros da Banca Examinadora, professores Roberto dos Santos Bartholo Junior, Samuel Jurkiewicz e Édison Renato Pereira da Silva, pela gentileza e disposição para ler este trabalho e acrescentar suas valiosas contribuições.

Por fim, protocolo, neste ato, meu muito obrigada a todos aqueles que dividem comigo a alegria de viver e de ser feliz, que são parte de minha vida ou me ajudaram a juntar pedaços dela para seguir em frente. Peço, contudo, desculpas por não citar nomes, nem mesmo os dos mais queridos, pois considero desnecessário criar listas.

O professor Roberto dos Santos Bartholo Junior ensina a seus alunos que:
“engenheiro sem projeto é como nadador sem piscina”.
Como não sou engenheira, tomei a lição pessoalmente para concluir que:
ser humano sem projeto é como ser náufrago na vida.¹

...

*E desde então me banhei no Poema do Mar,
Infuso de astros, lactescentes, devorando
Verdes azuis: por onde, pálido flutuar,
Um afogado pensativo vai vagando;*²

...

(Arthur Rimbaud, 1854-1891. **O barco bêbado.**)

¹Anotações feitas em aula ministrada pelo professor Roberto dos Santos Bartholo Junior na disciplina Poder, Conhecimento e Ética I (UFRJ/Coppe/PEP). 6 jul. 2013.

²...

*Et dès lors, je me suis baigné dans le Poème
De la Mer; infusé d'astres, et lactescent,
Dévorant les azurs verts; où, flottaison blême
Et ravie, un noyé pensif parfois descend;*

...

(RIMBAUD, A. **O barco bêbado.** Tradução e apresentação: Afonso Henriques Neto. Rio de Janeiro: Ibis Libris, 2015.

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

TRILHOS NAS ESTRELAS: O PROJETO MAGLEV-COBRA À LUZ DOS
“TECHNOLOGY READINESS LEVELS” DA NASA

Luiza Maria da Silveira Lobo

Junho/2016

Orientador: Roberto dos Santos Bartholo Junior

Programa: Engenharia de Produção

Esta dissertação tem como objetivo examinar os passos necessários para o estabelecimento de uma inovação tecnológica no Brasil. Para tanto, apresenta-se um estudo do projeto MagLev-Cobra como exemplo do desenvolvimento de tecnologia no ambiente universitário, considerando, contudo, as limitações impostas em nosso País. O estudo tem como base os Níveis de Prontidão de Tecnologia (TRLs). A abordagem qualitativa da pesquisa com foco neste estudo de caso visa mapear o desenvolvimento da tecnologia, conhecida como levitação magnética supercondutora (SML), e identificar todas as fases do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra até a presente data. Os procedimentos metodológicos ajudam a traçar a linha do tempo do projeto, desde a sua concepção até os dias atuais, compreendendo o período de 1990 a 2016. A análise das séries temporais é formulada, primeiro, para assinalar as características da trajetória tecnológica presentes na iniciativa e, em seguida, verificar a aplicabilidade do método em apreço como referência para a investigação da maturação de tecnologia. Por fim, abordamos algumas considerações com a finalidade de ajudar a pavimentar o caminho para o sucesso do projeto MagLev-Cobra.

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

RAILS ON STARS: THE MAGLEV-COBRA PROJECT IN THE LIGHT OF NASA'S
"TECHNOLOGY READINESS LEVELS"

Luiza Maria da Silveira Lobo

June/2016

Advisor: Roberto dos Santos Bartholo Junior

Department: Production Engineering

This dissertation aims to examine the steps needed to establish a technological innovation in Brazil. It presents a study of MagLev-Cobra project as an example of technology development in the university environment, considering, however, the restrictions imposed on our country. The study is based on the Technology Readiness Levels (TRLs). The qualitative research approach focused on this case study aims to map the development of the technology, known as superconducting magnetic levitation (SML), and to identify all phases of the MagLev-Cobra project life cycle to date. The methodological procedures help to display the design timeline, from its conception to the present day, covering the period from 1990 to 2016. The analysis of time series is designed first to identify the technological trajectory present in the initiative, and then to check the applicability of the method in question as a reference for the investigation of technology maturation. At the end, we address some considerations in order to help paving the way for the success of the MagLev-Cobra project.

SUMÁRIO

1	CONSTRUÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
1.1.	Introdução	1
1.2.	Objetivos do estudo	6
1.3.	Questões de pesquisa	7
1.4.	Proposições teóricas e delimitação da pesquisa	7
1.5.	Método de pesquisa	9
1.6.	Motivação	12
1.7.	A estrutura do trabalho	15
2	O PROCESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA	19
2.1	Relação entre economia e inovação	19
2.2	Conceito de inovação e seus indicadores	21
2.3	O novo marco legal da inovação	25
2.4	Noção de tecnologia	26
3	A ORIGEM	32
3.1	O surgimento dos TRLs nas décadas de 1960 e 1970	32
3.2	A criação da escala TRLs na década de 1980	36
3.3	A consolidação do método TRLs na década de 1990	39
3.4	A disseminação do método TRLs	46
4	O USO DO MÉTODO TRLs POR ORGANIZAÇÕES PÚBLICAS E PRIVADAS	51
4.1	Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço dos Estados Unidos (Nasa)	51
4.2	Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD)	54
4.3	Agência Espacial Europeia (ESA)	56
4.4	Universidades e institutos norte-americanos	56
4.5	Demais organizações públicas e privadas	57
5	O CONCEITO DOS NÍVEIS DE PRONTIDÃO DE TECNOLOGIA	60
5.1	Conceito dos TRLs	60
5.2	Descrição e exemplos dos nove níveis TRLs	65
6	AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DE TECNOLOGIA	89
6.1	Aplicação da escala TRLs	89
6.2	Avaliação da maturidade de tecnologia	92
6.3	Limitações do método TRLs	106
6.4	Benefícios do uso dos TRLs	111
6.5	Nível TRL 10	116

7	OS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	119
7.1	O plano de desenvolvimento da pesquisa.....	119
7.2	Coleta dos dados.....	120
7.3	Organização e seleção dos dados	124
7.4	Leitura e categorização dos dados.....	124
7.5	Interpretação dos dados	126
8	O CICLO DE VIDA DO PROJETO MAGLEV-COBRA	137
8.1	As etapas do desenvolvimento da tecnologia SML no ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra	137
8.2	Pré-fase A: estudos dos conceitos	141
8.3	Fase A: desenvolvimento do conceito e da tecnologia.....	143
8.4	Fase B: conclusão do desenvolvimento da tecnologia e plano preliminar do projeto.....	147
8.5	Fase C: projeto final e fabricação.....	153
8.6	Fase D: montagem do sistema, integração, testes e demonstração técnica....	158
8.7	Fase E: lançamento, operações e manutenção do sistema.....	159
8.8	Fase F: término do projeto.....	160
9	A TECNOLOGIA DO PROJETO MAGLEV-COBRA.....	162
9.1	O Maglev-Cobra como projeto de inovação tecnológica.....	162
9.2	O ciclo de vida da tecnologia	164
9.3	As abordagens do ciclo de vida da tecnologia	167
9.4	O ciclo de vida da tecnologia e os TRLs.....	168
9.5	As etapas do Maglev-Cobra e o diagrama do ciclo de vida da tecnologia....	171
10	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	173
10.1	Conclusão	173
10.2	Considerações finais.....	180
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	182
	APÊNDICE A - Obras consultadas	197
	APÊNDICE B - Quadro da escala TRLs da Nasa	199
	APÊNDICE C - Quadro de definição e descrição de termos técnicos.	201
	APÊNDICE D - Minuta de carta convite para entrevistas.....	204
	APÊNDICE E - Minuta de termo de autorização de identificação e de uso de imagem e depoimentos.	205
	APÊNDICE F - Minuta de termo de confidencialidade e sigilo	207
	APÊNDICE G - Minuta de roteiros de questões-chave	210
	APÊNDICE H - Minuta de relatório de dados	211

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fotos da pista experimental vista da estação do CT2 e do módulo operacional chegando na estação do CT1, da UFRJ.	2
Figura 2- Foto de uma das marcas de pegadas deixadas em solo lunar.	33
Figura 3 - O processo de maturação de tecnologia descreve os nove níveis TRLs, reproduzidos no Plano Estratégico do Programa de Transporte de Tecnologia da Nasa.	42
Figura 4 - A estratégia de maturação de tecnologia da Nasa mostra os nove níveis da escala TRLs mapeados por áreas de responsabilidade.	43
Figura 5 - Foto do veículo robótico de exploração Sojourner em Marte.	44
Figura 6 - Retrato do físico Heike Kamerlingh Onnes.	68
Figura 7 - Primeiras medições de supercondutividade, de acordo com a resistência de um capilar de mercúrio como uma função da temperatura.	68
Figura 8 - Foto do telescópio espacial Hubble (HST) iniciando sua separação do ônibus espacial Discovery, seguindo seu lançamento na missão STS-82.	71
Figura 9 - Esquema do processo dos Níveis de Prontidão de Tecnologia (TRLs) para diminuir o barulho das turbinas dos aviões a jato.	87
Figura 10 - Ciclo de vida de um projeto de P&D.	93
Figura 11 - Processo de Avaliação da Maturidade de Tecnologia (TMA) da Nasa.	96
Figura 12 - Estrutura analítica de um produto, dividido em três camadas de sistema, subsistemas e componentes.	99
Figura 13 - Modelo de interação entre os estudos da arquitetura e as avaliações da tecnologia no processo de maturação.	103
Figura 14 - Foto do fenômeno da levitação magnética.	129
Figura 15 - Foto do Lasup.	130
Figura 16 - Foto da apresentação da prova de conceito.	131
Figura 17 - Foto do protótipo funcional levitando sobre pista de 12 metros no hangar do Bloco I-2000.	132
Figura 18 - Fotos da pista experimental e do módulo operacional entre o CT 1 e o CT2.	133
Figura 19 - Fotos da construção da pista oval e testes de simulação com o protótipo em escala reduzida.	145
Figura 20 - Foto de teste de validação da maquete em 3D, projetada no computador pelo Laber/INT.	149
Figura 21 - Fotos de testes de validação do sistema de levitação magnética realizado no Lasup.	152
Figura 22 - Fotos de testes com nitrogênio líquido no hangar do Bloco I-2000 e com o criostato integrado ao módulo operacional estacionado no CT 1.	155
Figura 23 - Foto do módulo operacional do MagLev-Cobra no hangar do Bloco I-2000.	157
Figura 24 - Fotos da apresentação do MagLev-Cobra na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) / UFRJ, com a participação de alunos da Faetec, em 21 de outubro de 2015.	159
Figura 25 - Imagem da Ilha do Fundão, com a planta da Cidade Universitária, projetada de acordo com o Plano Diretor da UFRJ 2016 – 2020.	161

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Níveis de Prontidão de Tecnologia	4
--	---

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Representação da estrutura da dissertação	18
Quadro 2 - Evolução dos Níveis de Prontidão de Tecnologia.....	50
Quadro 3 - Níveis de Prontidão de Tecnologia – TRLs criados pela Nasa.....	63
Quadro 4 - Relação entre TRLs e custos estimados para um projeto de P&D.....	88
Quadro 5 - Relação das principais avaliações a serem efetuadas para a transição entre fases do ciclo de vida de um projeto de P&D da Nasa.....	94
Quadro 6 - Plano de desenvolvimento da pesquisa.	120
Quadro 7 - Linha do tempo do projeto MagLev-Cobra.....	128
Quadro 8 - Linha do tempo do período 1986 a 2016. Projeção da relação MagLev-Cobra / método TRL.	134
Quadro 9 – Ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra.....	140

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação de investimentos efetuados pela Nasa, no valor de US\$ 1 bilhão de dólares norte-americanos, em tecnologias pioneiras e transversais por nível de TRLs, durante o ano fiscal de 2012 dos Estados Unidos.	53
Gráfico 2 - Curva-S da tecnologia.	165
Gráfico 3 - O ciclo de vida da tecnologia em nove estágios.	167
Gráfico 4 - Diagrama do ciclo de vida de uma tecnologia com os TRLs.	169
Gráfico 5 - Diagrama do ciclo de vida de uma tecnologia com as fases do ciclo de vida do projeto.	170
Gráfico 6 - As etapas do projeto MagLev-Cobra e o diagrama do ciclo de vida da tecnologia.	171

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil
AD ²	Avaliação do Avanço do Grau de Dificuldade, Nasa (<i>Advancement Degree of Difficulty Assessment</i>)
AFRL	Laboratório de Pesquisa da Força Aérea, Estados Unidos (<i>Air Force Research Laboratory</i>)
APV	Automação de Mobilidade de Pessoas (<i>Automated People Mover</i>)
ART	Programa de Pesquisa e Tecnologia Avançada, Nasa (<i>Advanced Research and Technology Program</i>)
ATD	(Projetos de) Desenvolvimento de Tecnologia Avançada, Nasa (<i>Advanced Technology Development [Projects]</i>)
Base R&T	Programa Base de Pesquisa e Tecnologia Espaciais, Nasa, Estados Unidos (<i>Base Research and Technology Program</i>)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Brasil
Caltec	Instituto de Tecnologia da Califórnia, Estados Unidos (<i>California Institute of Technology</i>)
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil
Cecom	Comando de Comunicações Eletrônicas do Exército, Estados Unidos (<i>Communications Eletronics Command</i>)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brasil
Coppe	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, UFRJ, Brasil
Coppetec	Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos, UFRJ, Brasil
Darpa	Agência de Projetos de Pesquisa Avançada em Defesa, Estados Unidos (<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>)
DDT&E	[Processos de] Design, Desenvolvimento, Teste e Avaliação (<i>Design, Development, Test and Evaluation [Processes]</i>)
DE	Regime de Dedicção Exclusiva, Brasil

DOD	Departamento de Defesa, Estados Unidos (<i>Department of Defense</i>)
EAP	Estrutura Analítica do Projeto (<i>Project's Work Breakdown Structure – WBS</i>)
EC	Emenda Constitucional, Brasil
EDL	Levitação Eletrodinâmica
EML	Levitação Eletromagnética
Embrapii	Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial, Brasil
ESA	Agência Espacial Europeia, Paris, França (<i>European Space Agency</i>)
FAA	Administração Federal de Aviação norte-americana (<i>Federal Aviation Administration</i>)
Faperj	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
FAPs	Fundações de Amparo à Pesquisa, Brasil
FBC	Gestão Mais Rápida, Melhor e Mais Barata (<i>Faster, Better, Cheaper Management</i>)
Finep	Financiadora de Estudos e Projetos, Brasil
Focused R&T	Programa Focado de Pesquisa e Tecnologia Espaciais, Nasa, Estados Unidos (<i>Focused Space Research and Technology Program</i>)
FOM	Figura Programática de Mérito (<i>Programmatic figure of merit</i>)
GAO	Agência de Controladoria Geral do Governo dos Estados Unidos (U.S. Government Accountability Office)
GVA	Gerenciamento do Valor Agregado (<i>Earned Value Management – EVM</i>)
HEDM	Matéria de Alta Densidade de Energia (<i>High Energy Density Matter</i>)
HST	Telescópio Espacial Hubble (<i>Hubble Space Telescope</i>)
HTS	Supercondutores de Elevada Temperatura Crítica (<i>high-temperature superconductor</i>)

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil
Iedi	Instituto de Estudos para Desenvolvimento Industrial, Brasil
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial, Brasil
Insead	Escola de Pós-Graduação em Negócios para o Mundo – Campus Europa, Fontainebleau, França
INT	Instituto Nacional de Tecnologia, Brasil
IRL	Níveis de Prontidão de Integração (<i>Integration Readiness Levels</i>)
ISO	Organização Internacional para Padronização, Genebra, Suíça (<i>International Organization for Standardization</i>)
Itam	Metodologia de Análise de Tecnologia Integrada (<i>Integrated Technology Analysis Methodology</i>)
ITI	Índice de Tecnologia Integrada (<i>Integrated Technology Index</i>)
ITP	Plano de Tecnologia Integrada para o Programa Espacial Civil, Estados Unidos (<i>Integrated Technology Plan for the Civil Space Program</i>)
ITS	Sistemas de Transporte Inteligente (<i>Intelligent Transportation Systems</i>)
JPL	Laboratório de Propulsão a Jato, Nasa (<i>Jet Propulsion Laboratory</i>)
KDPs	Pontos-chave de Decisão (<i>Key Decision Points</i>)
KPPs	Parâmetros-chave de Desempenho (<i>Key Performance Parameters</i>)
Laber	Laboratório de Ergonomia, INT, Brasil
Lasup	Laboratório de Aplicações de Supercondutores, UFRJ, Brasil
LTDS	Laboratório de Tecnologia e Desenvolvimento Social, UFRJ, Brasil
MAIS	Principais Sistemas de Informação Automatizados, DOD, Estados Unidos (<i>Major Acquisition Information Systems</i>)

MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasil
MDAP	Principais Programas de Aquisição de Defesa, DOD, Estados Unidos (<i>Major Defense Acquisition Programs</i>)
MRL	Níveis de Prontidão de Manufatura (<i>Manufacturing Readiness Levels</i>)
MSFC	Centro Marshall de Voo Espacial, Nasa, Estados Unidos (<i>Marshall Space Flight Center</i>)
Nasa	Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço, Estados Unidos (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NRS	National Research Council, Estados Unidos
NSC	Conselho Nacional Espacial, Estados Unidos (<i>National Space Council</i>)
OAST	Departamento de Aeronáutica e Tecnologia Espacial, Nasa, Estados Unidos (<i>Nasa Office of Aeronautics and Space Technology</i>)
OEAT	Departamento de Aeronáutica, Exploração e Tecnologia, Nasa, Estados Unidos (<i>Office of Aeronautics, Exploration and Technology</i>)
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico, Paris, França
OSS	Departamento de Ciência Espacial, Nasa, Estados Unidos (<i>Office of Space Science</i>)
PBS	Estrutura analítica do produto (<i>Product Breakdown Structure</i>)
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento (<i>Research and Development – R&T</i>)
PDR	Revisão Preliminar do Design (<i>Preliminary Design Review</i>)
PDP	Plano e Definição do Projeto
PDT	Plano de Desenvolvimento da Tecnologia
PDTU	Plano Diretor de Transporte Urbano
PEE	Programa de Engenharia Elétrica da Coppe/UFRJ

PEP	Programa de Engenharia de Produção da Coppe/UFRJ
PI	Investigador do Programa (<i>Program investigator</i>)
PIB	Produto Interno Bruto, Brasil
Pintec	Pesquisa de Inovação Tecnológica, IBGE, Brasil
Poli	Escola Politécnica, UFRJ, Brasil
PPP	Plano Preliminar de Projeto (<i>Preliminary Project Plan</i>)
PPR	Requisitos Preliminares do Projeto (<i>Preliminary Project Requirements</i>)
R&D ³	Degrau de Dificuldade de Pesquisa e Desenvolvimento (<i>Research and Development Degree of Difficulty</i>)
RDC	Regime Diferenciado de Contratações, Brasil
RDEC	Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento de Comunicações Eletrônicas, Cecom, Estados Unidos (<i>Research and Development in Eletronics Communications</i>)
SDR	Revisão da Definição do Sistema (<i>System Definition Review</i>)
SEI	Plano de Iniciativa de Exploração Espacial, Estados Unidos (<i>Space Exploration Initiative</i>)
SJR	Indicador SCImago de Ranking de Periódico e País, <i>Consejo Superior de Investigaciones Científicas</i> (CSIC), Universidade de Granada, Extremadura, Carlos III (Madrid) and Alcalá de Henares, Espanha (<i>SCImago Journal & Country Rank</i>)
SML	Levitação Magnética Supercondutora (<i>Superconducting Magnetic Levitation</i>)
Space R&T	Programa de Pesquisa e Tecnologia Espaciais, Nasa, Estados Unidos (<i>Space Research and Technology Program</i>)
SRL	Níveis de Prontidão de Sistemas (<i>System Readiness Levels</i>)
SRLmax	Modelo de otimização dos níveis de prontidão de sistemas e solução algorítima (<i>System readiness level optimization model and solution algorithm</i>)

SRR	Revisão dos Requisitos do Sistema (<i>System Requirements Review</i>)
SRT	Programa de Pesquisa e Tecnologia de Apoio, Nasa (<i>Supporting Research and Technology Program</i>)
SSTIP	Plano de Investimento Estratégico em Tecnologia Espacial, Nasa (<i>The Nasa Strategic Space Technology Investment Plan</i>)
STO	Objetivo de Ciência e Tecnologia (<i>Science and Technology Objective</i>)
TA	Avaliação da Tecnologia (<i>Technology Assessment</i>)
TDP	Plano de Desenvolvimento de Tecnologia, Nasa (<i>Technology Development Plan</i>)
TMA	Avaliação da Maturidade de Tecnologia, Nasa (<i>Technology Maturity Assessment</i>)
TRA	Avaliação da Prontidão de Tecnologia, DOD <i>Technology Readiness Assessment</i>
Trar	Relatório de Avaliação da Prontidão de Tecnologia, Nasa (<i>Technology Readiness Assessment Report</i>)
TRL	Nível de Prontidão de Tecnologia (<i>Technology Readiness Level</i>)
TRLs	Níveis de Prontidão de Tecnologia [de TRL 1 a TRL 9] (<i>Technology Readiness Levels [from TRL 1 through TRL 9]</i>)
TRRA	Avaliação de prontidão de tecnologia e risco (<i>Technology readiness and risk assessment</i>)
TPPI	Produtos Tecnológicos e Processos de Inovações (<i>Technological Products and Processes Innovations</i>)
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
UK MOD	Ministério da Defesa do Reino Unido (<i>United Kingdom Minister of Defense</i>)
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos
Wipo	Organização Mundial da Propriedade Intelectual, Genebra, Suíça (<i>World Intellectual Property Organization</i>)

1 CONSTRUÇÃO DA DISSERTAÇÃO

1.1. Introdução

O MagLev-Cobra é um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), criado na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores (Lasup), do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), em parceria com a Escola Politécnica (Poli). Considerado uma inovação tecnológica, de concepção genuinamente nacional, esse projeto visa a construção de um trem urbano de Levitação Magnética Supercondutora (SML).

O Lasup foi fundado em 1990, pelo físico e professor Roberto Nicolisky, do Instituto de Física e pelo engenheiro e professor Richard Stephan, da Escola Politécnica, possibilitando a abertura de novas linhas de pesquisas científicas no Programa de Engenharia Elétrica (PEE) da Coppe. Com isso, as pesquisas sobre o fenômeno da Levitação Magnética Supercondutora (SML) se iniciaram na UFRJ em 1993. Essa tecnologia utiliza as propriedades diamagnéticas dos supercondutores de elevada temperatura crítica e do campo magnético produzido por ímãs de terras raras (MOON, 1994; STEPHAN; FERREIRA, 2012; STEPHAN et al., 2013; STEPHAN, 2015).

Projetado como alternativa para o transporte público, MagLev-Cobra começou a ser desenvolvido na UFRJ no ano 2000. Desde então, as pesquisas científicas evoluíram e os engenheiros do Lasup conseguiram construir um módulo veicular, propulsionado por forças magnéticas, que se move por meio de um motor linear, alimentado com energia elétrica, em uma pista elevada de cerca de 200 metros, localizada ente os Centros de Tecnologias 1 e 2 (CT 1 e CT 2) da UFRJ. Ao levitar, esse módulo operacional perde o contato com a superfície da pista experimental, eliminando, com isso, o atrito existente entre rodas e trilhos, comuns em trens de linhas férreas a que estamos acostumados (STEPHAN; FERREIRA, 2012; STEPHAN et al., 2013; STEPHAN, 2015). Em 2014, o Brasil passou a ser o primeiro país do mundo a ter uma pista experimental e um módulo veicular, em escala real, em operação, utilizando a tecnologia SML. Porém, muito ainda resta por fazer.



Figura 1 - Fotos da pista experimental vista da estação do CT2 e do módulo operacional chegando na estação do CT1, da UFRJ.

Fonte: Fotos feitas pela autora em 8 jun. 2016.

Como projeto de inovação tecnológica, o MagLev-Cobra tem o objetivo de construir um veículo de levitação magnética supercondutora, capaz de ser operado em vias elevadas ou sob o solo a uma velocidade que pode variar entre 10 km/h e 70 km/h. Concebido como um trem urbano, esse veículo vem sendo desenvolvido para atender às especificações do transporte público de passageiros em curtas distâncias e com paradas rápidas intercaladas, como as previstas para os trajetos casa-trabalho-casa. Para isso, o MagLev-Cobra foi engendrado com articulações múltiplas, que o possibilitam efetuar curvas com pequenos raios de 50 metros, bem como subir e descer rampas com inclinações de até 15° de uma superfície plana.

Entretanto, desde o início das pesquisas científicas sobre o fenômeno da supercondutividade na década de 1990 até a construção da pista experimental e do módulo experimental em 2014, o Brasil implementou diversas políticas públicas de incentivo à inovação e aprovou leis específicas para promover o desenvolvimento científico e tecnológico (BRASIL, 2004, 2005, 2015, 2016). Essas medidas influenciam, direta e indiretamente, projetos de P&D, como o MagLev-Cobra, mas não demonstram ser suficientes para estabelecer ações efetivas que promovam o progresso econômico e social, capaz de transformar em realidade as mudanças estruturais que nosso País tanto necessita.

Estudos recentes apontam que as políticas públicas adotadas nos últimos anos têm dado sinais contraditórios de apoio ao ambiente pró-inovação (TIRONI, 2005;

IBGE, 2013; DE NIGRI; CAVALCANTE, 2013; IEDI, 2016). Os projetos de P&D têm enfrentado limitações de recursos e entraves burocráticos que acarretam fatores, como aumento de custos e de cronograma de execução, entre outros, impedindo, com isso, o amadurecimento da tecnologia. Quando essas limitações são de tal ordem que impedem os engenheiros de quebrar a arrebentação, os projetos não conseguem ser medalha de ouro e estão fadados a incertezas adicionais de fracasso, tanto técnico como de gestão.

O desenvolvimento de um produto de base tecnológica, desde sua concepção até sua colocação no mercado para uso seguro pela sociedade precisa de políticas públicas eficazes, voltadas para a implementação de processo de avaliação da maturidade de tecnologia ao longo do ciclo de vida de um projeto de P&D. Nesse contexto, consideramos relevante estudar a trajetória evolutiva de uma tecnologia em nosso País, com o fim de identificar fatores críticos de sucesso e entraves burocráticos que influenciam o estabelecimento de um projeto de P&D, desde sua formulação até a implementação de uma inovação que possa ser comercializada.

Technology Readiness Levels é um método criado pela Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (Nasa), dos Estados Unidos e mundialmente usado, por organizações públicas e privadas, para a gestão do processo de desenvolvimento de tecnologia. Comumente mencionado de forma abreviada, pela sigla em inglês “TRLs”, e traduzido livremente para o nosso vernáculo como Níveis de Prontidão de Tecnologia, esse método consiste em medição sistemática, utilizada para dar apoio à avaliação da maturidade de uma determinada tecnologia e proporcionar a comparação de maturidade entre diferentes tipos de tecnologias (MANKINS, 1995). Os TRLs ajudam a identificar elementos e processos de desenvolvimento de um determinado sistema, subsistema ou componente, sendo considerados como ferramenta eficaz na avaliação da maturidade de tecnologia.

Formalmente adotado pela Nasa como parte de um processo global de avaliação de risco, os TRLs foram descritos pela primeira vez em artigo científico no fim da década de 1980 (SADIN, POVINELLI, ROSEN, 1989). Utilizados como uma ferramenta da engenharia de sistemas, eles foram criados para ajudar os engenheiros e cientistas da Nasa a avaliar a maturidade de uma tecnologia durante o ciclo de vida de um projeto de P&D.

Assim, para mensurar a prontidão de tecnologia, os TRLS estabelecem uma escala de nove níveis, que vão desde os princípios básicos sendo observados e

formulados, até a validação de um sistema real, demonstrado em voo, por meio de operações em missão bem-sucedida (NASA, 2007, 2013). Quando aplicado no início do ciclo de vida de um projeto de P&D, esse método fixa uma linha de base para que, a partir dela, a maturidade da tecnologia possa ser avaliada e seu progresso definido (NASA, 2007, 2012a, 2013). Assim, uma vez fixada a linha de base, cada nível deve ser galgado em cima do nível anterior, fazendo a tecnologia avançar gradativamente os nove níveis da escala. Geralmente, os TRLs são definidos com relação ao grau de complexidade do produto (sistema, subsistema ou componentes) e ao contexto no qual ele deverá ser operado (laboratório, ambiente relevante ou ambiente operacional que, no caso da Nasa é, na maioria das vezes, o espaço). A Tabela 1 descreve os nove níveis de prontidão de tecnologia da Nasa.

Tabela 1 - Níveis de Prontidão de Tecnologia

TRLs	DESCRIÇÃO
9	Sistema real “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida.
8	Sistema real concluído e “qualificado para voo” por meio de teste e demonstração.
7	Demonstração de protótipo do sistema em um ambiente operacional.
6	Demonstração de modelo ou protótipo do sistema/subsistema em um ambiente relevante.
5	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente relevante.
4	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente de laboratório.
3	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característico.
2	Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados.
1	Princípios básicos observados e relatados.

Fonte: NASA Systems Engineering Processes and Requirements – NPR 7123.1B, de 18 de abril de 2013, p. 100-102, Apêndice E, tradução nossa (NASA, 2013). Disponível em: <http://nodis3.gsfc.nasa.gov/npg_img/N_PR_7123_001B/_N_PR_7123_001B_.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2015.

Embora esteja em uso no mundo há mais de 20 anos, o método TRLs ainda não é completamente entendido e, por isso, muitas vezes mal interpretado. Existem diversas definições de TRLs. Muitos autores utilizam os termos prontidão (*readiness*) e maturidade (*maturity*) para se referir ao método ou o empregam alternativamente. No entanto, eles não têm o mesmo significado. Prontidão significa o estado de quem se acha pronto, ou seja, inteiramente feito ou construído, concluído ou terminado. Já maturidade é definida como o estado ou qualidade de maduro. Traduz o estágio de adulto, ou seja, o período do ciclo de vida entre a juventude e a velhice

(MATURIDADE, 2008-2013, 2011-2016; PRONTIDÃO, 2008-2013, 2011-2016, 2016)

Tetlay e John (2009) ponderam que, na engenharia de sistemas, as noções de prontidão e maturidade devem ser entendidas no contexto no qual são utilizadas. Entretanto, eles argumentam que a noção de maturidade está “encapsulada” dentro da noção de prontidão (TETLAY; JOHN, 2009, p. 3). Acreditam ser essa a razão pela qual os termos vêm sendo utilizados alternativamente. Porém, os autores afirmam que a maturidade e a prontidão são entidades direcionadas para questões completamente distintas que abrangem não só o escopo e o contexto do desenvolvimento de sistemas, mas, principalmente, o ciclo de vida da tecnologia (TETLAY; JOHN, 2009).

Prontidão, por um lado, refere-se ao processo de validação do produto durante o seu ciclo de vida. A validação é um processo iterativo, que se inicia com os requisitos do usuário e termina com a validação final do produto. A prontidão determina, portanto, se um sistema está ou não pronto, concluído, para ser usado no ambiente para o qual foi desenvolvido. A prova de validação é realizada por meio de testes, análises, inspeções e demonstrações que são conduzidos sob condições realistas e de acordo com os conceitos operacionais. Logo, para atingir a prontidão, um sistema precisa ser validado com relação aos requisitos do usuário e depende do contexto (laboratório, ambiente relevante ou ambiente operacional) para o qual foi desenvolvido (NASA, 2007; TETLAY; JOHN, 2009, p. 3-5).

A noção de maturidade, por outro lado, está relacionada ao processo de verificação do produto dentro do contexto de seu ciclo de vida (TETLAY; JOHN, 2009, p. 3-5). Para a Nasa, a verificação é a prova de conformidade do produto, que também é realizada por meio de testes, análises, inspeções ou demonstrações. Porém, diferentemente da validação, a prova de verificação é feita com base nos requisitos do sistema, subsistema ou componentes estabelecidos no início do projeto, e pode ser produzida em diferentes fases do seu ciclo de vida (NASA, 2007, p. 15). A maturidade é, então, verificada com relação aos requisitos do sistema e deve avaliar se esse sistema foi implementado com sucesso e de acordo com o projeto.

A partir desses entendimentos, é possível considerar a necessidade de um estudo aprofundado sobre os TRLs, uma vez que esse método pode ajudar a mapear o processo de desenvolvimento de uma tecnologia durante seu ciclo de vida. A presente dissertação nasce, portanto, da constatação dessa necessidade. Buscamos examinar o método TRLs

como uma ferramenta de engenharia, voltada para a estratégia de gestão do desenvolvimento de tecnologia. Nesse sentido, este trabalho tem a finalidade de investigar a trajetória evolutiva da tecnologia SML ao longo do ciclo de vida do Projeto MagLev-Cobra, sob o método dos níveis de prontidão de tecnologia (TRLs).

Cumpre, contudo, ressaltar que os níveis de prontidão de tecnologia foram criados no contexto da Nasa e, portanto, desenvolvidos especificamente para a indústria aeroespacial/espacial, com base na avaliação da prontidão de voo (*flight readiness*) (MANKINS, 2002, 2009b; NASA, 2008, 2012a, 2013). Na presente dissertação, os TRLs foram usados como uma ferramenta que ajuda a compreender a gestão do desenvolvimento da tecnologia SML no projeto MagLev-Cobra.

1.2. Objetivos do estudo

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir para o avanço do conhecimento sobre o processo de desenvolvimento de tecnologia, com base no método TRLs criado pela Nasa. O valor deste trabalho está na colaboração que se propõe aqui a oferecer à academia em particular e à sociedade em geral como retribuição ao conhecimento adquirido – um estudo acerca da gestão da inovação tecnológica em um projeto de P&D.

Para alcançar esse objetivo, buscamos mapear o processo de desenvolvimento da tecnologia SML, mediante o estudo do projeto MagLev-Cobra no ambiente da Coppe/UFRJ, considerando, contudo, as limitações impostas pelas políticas públicas de nosso País para a execução de um projeto de estímulo à inovação.

A pesquisa de estudo do caso do projeto MagLev-Cobra, sob a perspectiva do método TRLs, permite apreender a complexidade do processo de amadurecimento da tecnologia SML. Isso inclui mudanças relevantes, que ocorrem com o seu aperfeiçoamento ao longo do ciclo de vida do projeto, e atendem ao exame das condições contextuais do mundo universitário, em especial aquelas que potencialmente interagem com o caso, frente às políticas brasileiras de inovação tecnológica.

O objetivo geral deste trabalho foi desmembrado nos seguintes objetivos específicos:

- (a) analisar o método TRLs, criado pela Nasa, como instrumento de mapeamento do processo de desenvolvimento da tecnologia SML no curso do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra;
- (b) identificar os fatores críticos para o sucesso da trajetória evolutiva da tecnologia SML durante o curso do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra;
- (c) relacionar algumas dificuldades enfrentadas pela equipe do Lasup no desenvolvimento da tecnologia SML e as soluções adotadas para superá-las.

1.3. Questões de pesquisa

Para o estudo do Projeto MagLev-Cobra, preferimos a formulação de questões em vez da apresentação de um problema, por entendermos ser necessário a realização de uma pesquisa aberta e abrangente. Nesse quadro, pretendemos responder às seguintes questões:

- **Questão 1:** como ocorreu o processo de amadurecimento da tecnologia SML ao longo do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra sob a abordagem da ferramenta da Nasa?
- **Questão 2:** quais as evidências que ajudaram a equipe do Lasup na tomada de decisões sobre o desenvolvimento da tecnologia?
- **Questão 3:** como a equipe do Lasup superou os entraves que diminuiriam o ritmo de amadurecimento da tecnologia SML e retardaram o prosseguimento do projeto MagLev-Cobra?

1.4. Proposições teóricas e delimitação da pesquisa

A ferramenta TRLs foi concebida pela Nasa para ser usada *a priori*, ou seja, na fase inicial de formulação de um projeto ou na fase em que se identificou a tecnologia. Os TRLs permitem uma visão do processo de amadurecimento de uma tecnologia ao longo do ciclo de vida de um projeto de P&D. Eles foram concebidos como ferramenta de suporte para a avaliação da maturidade de tecnologia, com o fim de evitar os riscos associados ao projeto, o aumento de custos e o descumprimento do cronograma, bem como de tentar frear o avanço do projeto sem que a tecnologia esteja realmente pronta e testada.

Quando a equipe do Lasup iniciou os trabalhos de formulação do projeto de construção de um trem de levitação magnética, os engenheiros não fizeram uso de nenhum método de avaliação de tecnologia. Por essa razão, não há um relatório que sirva de linha de base para delimitar o estado da arte em que se encontrava a tecnologia no começo do ciclo de vida do projeto. Também não há nenhum estudo sobre o processo de seu amadurecimento nas fases seguintes, de modo que seja possível comparar os dados e verificar o quanto a tecnologia evoluiu e o estado em que se encontra atualmente.

Entretanto, a ferramenta TRLs existe e vem sendo utilizada com sucesso pela Nasa e outras organizações ao redor do mundo há mais de 20 anos, sendo aplicada com outras métricas ou mesmo isoladamente, em diversos tipos de projetos de P&D e nas mais distintas áreas de pesquisa. Como não existe regra preestabelecida, mas apenas diretivas para sua aplicação, entendemos que o método TRLs pode ser interessante para analisar o desmembramento do projeto MagLev-Cobra do ponto de vista do amadurecimento da tecnologia SML.

Por essa razão, estamos utilizando essa ferramenta em uma aplicação derivada, distinta de seu propósito original, ou seja, o de dar suporte à avaliação da maturidade de tecnologia. O uso heterodoxo aqui empregado coloca os TRLs à serviço do conhecimento, não para explicar a maturidade da tecnologia SML, mas sim para ajudar a compreender o seu processo de desenvolvimento. Como o projeto MagLev-Cobra já se encontrava em andamento quando iniciamos a pesquisa para elaborar esta dissertação, estamos aplicando a ferramenta *a posteriori* para examinar as seguintes proposições teóricas:

- O estudo do projeto MagLev-Cobra ajuda a compreender o processo de desenvolvimento de tecnologia no contexto da universidade e das políticas públicas de nosso País.
- O uso heterodoxo do método TRLs pode auxiliar a descrever a trajetória evolutiva da tecnologia SML ao longo do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra, desde a sua formulação até a fase em que se encontra no fechamento da presente dissertação.
- A relevância do método para avaliar os níveis de prontidão de tecnologia, na forma como proposta neste estudo, pode ter papel decisivo não só para o

coordenador e o gestor do projeto, mas também para os demais membros da equipe e os investidores.

As observações extraídas neste estudo de caso não implicam validade para “n” casos e, portanto, não podem ser generalizadas. Isso significa dizer que o método TRLs não se aplica a qualquer projeto de P&D ou pode ser utilizado de forma heterodoxa, a qualquer tempo, durante o ciclo de vida de qualquer projeto de inovação tecnológica. Preserva-se o caráter unitário do caso pesquisado, sendo certo que as observações feitas neste trabalho de pesquisa se aplicam unicamente ao projeto MagLev-Cobra.

Considerando que o projeto MagLev-Cobra continua em andamento, o escopo deste estudo restringe-se à análise do processo de desenvolvimento da tecnologia durante os quatro blocos de etapas do projeto já percorridos, que vão desde a realização da pesquisa científica e formulação dos princípios de base até a demonstração do modelo representativo em ambiente operacional. Esses quatro blocos de etapas do projeto compreendem o período de 1990 a 2016.

Importante, contudo, ressaltar que o quarto bloco ainda não está concluído. Os testes de desempenho operacional do MagLev-Cobra estão atualmente em curso na pista experimental, localizada entre os Centros de Tecnologia 1 e 2 da UFRJ e, provavelmente, continuarão a ser realizados mesmo após a conclusão desta dissertação, certamente se estendendo durante todo o ano de 2016.

Por conseguinte, as fases do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra aqui estudadas abrangem o período desde a sua concepção em 1990 até o fim de 2015. As fases relativas aos testes de operacionalidade começaram a ser realizadas enquanto escrevíamos esta dissertação.

1.5. Método de pesquisa

Para atender aos objetivos propostos na presente dissertação, adotamos a abordagem qualitativa, com foco no método de estudo de caso único, de caráter descritivo e exploratório. O estudo de caso visa investigar “um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos” (YIN, 2015, p. 17). O caráter descritivo do estudo proporciona a identificação e a descrição de múltiplas manifestações sobre um determinado fenômeno em seu ambiente. Já o delineamento

exploratório ocorre quando o tema a ser abordado foi pouco explorado (GIL, 2009), o que parece ser uma escolha lógica para a pesquisa em tela.

Nesse sentido, este trabalho compreende um estudo do projeto MagLev-Cobra como fenômeno contemporâneo do desenvolvimento da tecnologia SML dentro do ambiente universitário, considerando, contudo, os limites encontrados para a execução de um projeto de P&D em nosso País. Os trabalhos concentraram-se na pesquisa descritiva e exploratória para observar, registrar e analisar fatos com a intenção de compreender como ocorreu a trajetória evolutiva da tecnologia SML no contexto do Lasup.

Em um primeiro momento, efetuamos o estudo aprofundado do método TRLs. Em seguida, traçamos a sequência de eventos que marcaram o processo de desenvolvimento da tecnologia SML, enquanto descrevíamos as fases do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra.

A escolha da abordagem qualitativa deve-se ao fato desse método de pesquisa proporcionar melhor visão e compreensão do caso estudado, caracterizando-se como uma forma de investigação não estruturada (CRESWELL, 2010). A pesquisa qualitativa torna-se particularmente útil ao caso concreto, porque permite explorar o contexto do laboratório onde ocorre o fenômeno do desenvolvimento da tecnologia. Ela também permite observar o processo de tomada de decisões da equipe de engenheiros, possibilitando um conhecimento aprofundado do projeto MagLev-Cobra.

Para fundamentar a pesquisa, a revisão bibliográfica foi construída com base na revisão sistemática da literatura, além de estruturada sob a moldura do fluxo acadêmico proposto por Proença Jr. e Silva (2016). Essa técnica de revisão foi adotada com o fim de buscar livros, artigos científicos e apresentações em congressos que pudessem orientar a pesquisa. Para tanto, foram definidos termos ou expressões-chave, tais como: *níveis de prontidão de tecnologia, TRL, inovação tecnológica, avaliação da maturidade de tecnologia, pesquisa e desenvolvimento, gerenciamento de projeto, política de inovação, estratégia de gestão de inovação, engenharia de sistemas, Nasa, Pintec, Manual de Oslo*, entre outras. A busca pelas referências bibliográficas utilizando os termos ou expressões-chave previamente definidos foi realizada tanto nas bases de consulta nacionais como internacionais. Em seguida, procedemos à categorização das referências bibliográficas, com a pretensão de otimizar sua leitura e buscar possíveis relações com o tema proposto neste trabalho (PROENÇA JUNIOR; SILVA, 2016).

Para o gerenciamento das referências bibliográficas, utilizamos, concomitantemente, os programas Sente 6³ para o sistema operacional Macintosh, e Zotero⁴ para os sistemas operacionais Macintosh e Windows. As duas plataformas foram usadas porque desenvolvemos a dissertação no Macintosh e utilizamos os computadores do Laboratório de Tecnologia e Desenvolvimento Social (LTDS) com o sistema operacional Windows. Além de fornecer maior flexibilidade, a utilização de ambas as plataformas permitiu-nos aumentar o espectro da pesquisa – os artigos que não puderam ser obtidos por meio do Sente 6, foram capturados pelo Zotero. Ademais, o Zotero funcionou perfeitamente no Mac, possibilitando a migração dos dados para as respectivas coleções criadas para a pesquisa.

Ao construirmos nossa base de dados bibliográficos, percebemos que muito pouco foi escrito a respeito do processo de desenvolvimento de tecnologia em si, embora sua gestão seja apontada como um dos mais relevantes aspectos para a competitividade entre organizações e o crescimento econômico e social dos países. A maioria dos artigos sobre inovação trata de histórias de sucesso ou de fracasso, analisa casos específicos ou, ainda, compara políticas públicas e indicadores. Poucos autores se debruçam sobre o desenvolvimento do conhecimento e da tecnologia como uma entrada (*input*) do processo de inovação. Para eles, o desenvolvimento de tecnologia se baseia no conceito da teoria da lógica difusa (*Fuzzy Theory*), considerando o impacto de incertezas sobre o sucesso do projeto (NOLTE, 2008).

A coleta e análise dos dados foram realizadas simultaneamente e divididas em duas partes. A primeira compreende a revisão bibliográfica sobre o método TRLs desde o seu surgimento na década de 1960 até 2015. A segunda parte foi efetuada para fins de investigação do processo de desenvolvimento da tecnologia no projeto MagLev-Cobra e abrange o período de 1990 a 2015. Essa segunda parte da análise dos dados está estruturada em descrições fidedignas, minuciosas e aprofundadas sobre o projeto MagLev-Cobra, a fim de garantir a validade externa, fornecendo um arcabouço sólido sobre o caso a qualquer pessoa interessada na transferência de informações. Os procedimentos metodológicos de coleta e análise de dados do projeto MagLev-Cobra

³ O software Sente 6 (*Academic Reference Management for Mac*) pertence à empresa Third Street Software, Inc. Disponível em: <<http://www.thirdstreetsoftware.com/site/Sente.html>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

⁴ O software Zotero é um gerenciador de referências em *software* livre e de código aberto, desenvolvido pelo Centro de História e Novas Mídias da Universidade George Mason. Disponível em: <<https://www.zotero.org>>. Acesso em: 16 out. 2014.

foram efetuados de acordo com o plano de desenvolvimento da pesquisa de campo e estão minuciosamente relatados no capítulo 7. Eles constituem a base para a análise do processo de desenvolvimento da tecnologia MagLev-Cobra sob o enfoque do método TRLs, conforme apresentada nos capítulos 8, 9 e 10.

Além da impossibilidade de generalização, a abordagem da pesquisa qualitativa está limitada à atuação do pesquisador como responsável pela coleta de dados (CRESWELL, 2010). No caso presente, nos mantivemos sempre atentos à identificação dos valores pessoais, das suposições e dos vieses no início do estudo. Para superar essa limitação, focamos no discurso dos entrevistados e nas frases por eles ditas; e para remover possíveis limitações que os próprios entrevistados pudessem apresentar com respostas enviesadas, procedemos à triangulação dos dados, utilizando somente as fontes que pudessem confirmar os fatos apresentados.

1.6. Motivação

A motivação para escrever o presente trabalho tem sua origem no ano de 2000, quando começamos a prestar consultoria sobre questões relativas a projetos de P&D. Em maio de 2004, tivemos o primeiro contato com o projeto MagLev-Cobra e, a partir de então, abriu-se a nossa frente uma estrada de acesso a novos conhecimentos.

Quando iniciamos trabalhos para o projeto MagLev-Cobra, assim como para os demais projetos de P&D da Coppe/UFRJ, não tínhamos noção clara de como realmente ocorre o fenômeno do desenvolvimento de tecnologia em um ambiente de laboratório de uma universidade pública federal; muito menos, havíamos ouvido falar dos níveis de prontidão. Apesar das questões que nos eram apresentadas tratarem especificamente de temas jurídicos, percebemos que estavam relacionadas ao processo de desenvolvimento de tecnologia e, portanto, acarretavam consequências a todos os demais aspectos do projeto, em especial aos assuntos concernentes a prazos, financiamentos, aumentos de custos e riscos.

Com isso, percebemos que nosso trabalho estava relacionado ao resultado do projeto de P&D e, mais especificamente, envolvia questões pontuais que dificultavam seu andamento por exemplo, problemas referentes a termos de concessão e aceitação de apoio financeiro; relação de apoio da Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos (Coppetec) para aquisição e importação de insumos e

equipamentos; formulação de relatórios e de respostas a inquéritos em órgãos da Administração Pública; concessão de bolsas a alunos da pós-graduação pela fundação; contratação de pesquisadores; patentes e direitos autorais, dentre outros.

Ao conviver com professores, engenheiros e pesquisadores em laboratórios situados no ambiente universitário, tivemos a oportunidade de observar, nos últimos anos, as dificuldades de se gerenciar um processo de desenvolvimento de tecnologia. Assim, a curiosidade em entender como ocorre esse processo foi, e continua a ser, uma motivação de suma importância.

Em 2004, o projeto MagLev-Cobra se encontrava na fase de realização da “prova de conceito”. Naquela época, a equipe do Lasup trabalhava na construção, em escala reduzida, de um protótipo de veículo de levitação magnética supercondutora. Certamente, havia um nível elevado de incertezas, pois os engenheiros estavam tentando demonstrar a viabilidade do conceito por trás da tecnologia.

Nesse sentido, ao acompanhar a equipe do Lasup vivenciamos na prática a regra de que “quanto maior o nível de incerteza, menor é o nível de prontidão da tecnologia” e, em grau exponencial, maiores são a quantidade e o tamanho dos problemas para desenvolver essa tecnologia. O futuro do projeto era, portanto, uma incógnita. Não se tinha uma visão sobre a gestão da inovação nos moldes da que se tem hoje em dia. Ao contrário, todos os esforços eram direcionados para a busca de soluções de problemas à medida que iam surgindo.

Assim, uma visão voltada para o desenvolvimento de tecnologia começou a ser elaborada no período entre 2008 e 2012, ou seja, durante a construção do protótipo funcional e a execução dos testes de viabilidade técnica do MagLev-Cobra. Começamos a trabalhar mais intensamente no projeto em 2010, tendo em vista que as diretorias da Coppe e da Fundação Coppetec, bem como a Reitoria da UFRJ, os Coordenadores do Programa de Engenharia Elétrica e do projeto tentavam obter financiamentos para o MagLev-Cobra nas agências de fomento: Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj). Naquela época, alguns pedidos de patentes haviam sido depositados no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) e, com isso, as características de inovação tecnológica que sustentavam o projeto foram questionadas, especialmente no tocante à Lei nº 10.973/2004, a Lei de Inovação (Brasil, 2004).

Importante, contudo, esclarecer que nossa participação no projeto MagLev-Cobra não foi a de um gestor, nem a de um desenvolvedor de tecnologia, mas sim a de um colaborador que integrou a equipe para prestar assessoria, atendendo a chamadas pontuais para assistir em problemas específicos que ocorriam no curso do projeto. Essa situação permitiu-nos construir uma relação de permeabilidade, porque nos possibilitou manter, ao mesmo tempo, um olhar de fora e outro, de dentro do projeto.

Por um lado, ao prestar consultoria, tivemos a oportunidade de trabalhar no projeto com uma visão voltada para os interesses de diversos atores, especialmente no que concerne ao apoio da Fundação Coppetec, aos direitos autorais da universidade e dos engenheiros envolvidos com a tecnologia, aos investimentos feitos pelas agências de fomento e empresas parceiras. Por outro lado, durante as pesquisas no mestrado, como pesquisadora, acompanhamos o dia a dia das atividades do Lasup, participamos das reuniões da equipe, de palestras e congressos, assistimos aos testes operacionais, à organização da documentação etc. Porém, temos que reconhecer um contraponto inegável: as observações oriundas deste estudo são subjetivas e, como tal, serão tratadas mais adiante com propriedade no capítulo 7 e seguintes.

Nesse contexto, o desafio de iniciar o mestrado em Engenharia de Produção, com um viés transversal a nossa carreira profissional, fez a motivação crescer ainda mais, especialmente com os debates em torno do marco legal da inovação e as mudanças nas políticas públicas. Durante o curso, a parceria entre o Laboratório de Tecnologia e Desenvolvimento Social (LTDS), do Programa de Engenharia de Produção (PEP), e o Lasup, do Programa de Engenharia Elétrica (PEE), proporcionou a criação de atividade interdisciplinar, tendo como tópico especial o estudo do projeto MagLev-Cobra. Essa atividade acadêmica não só refletiu o perfil interdisciplinar e as dimensões tecnológicas da Coppe/UFRJ, como também proporcionou-nos experiência enriquecedora, vindo a agregar novos conhecimentos que deram origem ao tema deste trabalho.

À medida que avançávamos na dissertação, íamos nos despidendo da roupagem jurídica e nos envolvendo com a pesquisa científica sobre o estudo do processo de desenvolvimento da tecnologia MagLev-Cobra. Com isso, fomos, aos poucos, assimilando o espírito do projeto, traçando uma interação com o ambiente do laboratório e, ao mesmo tempo, conquistando a confiança dos membros da equipe.

Nessa jornada, o desafio de aliar a experiência profissional à busca por novos conhecimentos nos exigiu quebrar paradigmas e investigar caminhos alternativos que nos permitiram analisar, em tempo real, os impactos de um projeto de P&D em curso no Lasup. Além disso, a colaboração do LTDS nos propiciou olhar a perspectiva da gestão de inovação tecnológica em face das políticas públicas que se apresentam em nosso País.

1.7. A estrutura do trabalho

Nesta dissertação, adotamos a estrutura sistemática em capítulos e itens. O texto é apresentado na primeira pessoa do plural, incorporando as experiências compartilhadas com professores, engenheiros, pesquisadores e técnicos do Lasup e, ao mesmo tempo, reproduzindo os diálogos que se inserem no contexto da Coppe/UFRJ e do Brasil. Trata-se, portanto, não só da narrativa da pesquisadora, mas também das falas de todos aqueles que clamam por uma reorganização das estruturas de nosso País em busca de inovações tecnológicas.

Neste capítulo 1, apresentamos a construção desta dissertação, alicerçada sobre os pontos que compreendem o projeto MagLev-Cobra, os TRLs, objetivos do estudo, questões, proposições teóricas, método de pesquisa e motivação. No fim, como se depreende dessas linhas, fixamos a estrutura do trabalho.

No capítulo 2, traçamos apontamentos sobre o processo de inovação tecnológica. Começamos com uma introdução acerca do processo de desenvolvimento de tecnologia, assinalando temas inerentes à relação entre economia e inovação, conceito de inovação e seus indicadores de mensuração, além de abordarmos pontos sobre o marco legal da inovação e traçarmos uma noção geral sobre tecnologia.

No capítulo 3, iniciamos a revisão da literatura sobre o método TRLs. Para melhor compreensão sobre o assunto, buscamos a origem da criação dessa ferramenta, situando-a no contexto histórico. Assim, começamos com um estudo sobre o surgimento do conceito de prontidão de tecnologia nos anos de 1960 e 1970. Em seguida, analisamos o desenvolvimento da escala TRLs na década de 1980 e avançamos pela história para percorrer o caminho de consolidação do método na década de 1990. Por fim, alinhavamos a disseminação do método TRLs a partir do ano 2000.

O capítulo 4 contém um breve estudo sobre o uso do método TRLs por organizações públicas e privadas. Assim, procuramos fornecer um panorama de como esse método passou a fazer parte das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento de tecnologia, vindo, posteriormente, a ser regulamentado em normas e procedimentos da Nasa, do Departamento de Defesa (DOD) dos Estados Unidos, da Agência Espacial Europeia (ESA), bem como de universidades, institutos de tecnologia e organizações privadas. No Brasil, em especial, traçamos breves linhas sobre a regulamentação dos TRLs pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a formalização do uso da escala pela Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii).

O capítulo 5 versa sobre o conceito dos níveis de prontidão de tecnologia. Primeiro, apresentamos a definição dos TRLs, inserindo-os no contexto do processo de desenvolvimento de tecnologia. Em seguida, descrevemos cada um dos nove níveis de prontidão de tecnologia e apontamos exemplos ilustrativos.

No capítulo 6, promovemos uma análise geral sobre a aplicação da escala TRLs e examinamos o processo de avaliação da prontidão de tecnologia pela Nasa. Assim como toda ferramenta, os TRLs também têm limitações e benefícios. Alinhavamos alguns deles, considerados relevantes, sem, contudo, esgotar o assunto neste trabalho. Por fim, encerramos o capítulo com uma descrição breve sobre as recentes propostas de se incluir mais um nível, TRL 10, à escala da Nasa.

Em continuação, o capítulo 7 concentra os procedimentos metodológicos delineados de acordo com o plano de desenvolvimento da pesquisa de campo. O plano prevê a coleta, organização, seleção, leitura e categorização das informações obtidas sobre o projeto MagLev-Cobra. A validação e a verificação dos dados são realizadas mediante consulta à equipe dos engenheiros do Lasup. No fim, projetamos duas linhas do tempo: uma para delinear os blocos de etapas que assinalam o amadurecimento da tecnologia ao longo do curso do projeto MagLev-Cobra; outra para situar o projeto MagLev-Cobra no contexto da evolução do método TRLs.

No capítulo 8, apresentamos o estudo do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra. Assim, mapeamos as séries temporais para caracterizar o desenvolvimento da tecnologia ao longo das fases do ciclo de vida do projeto. Nesse capítulo, abordamos as questões propostas no capítulo 1.

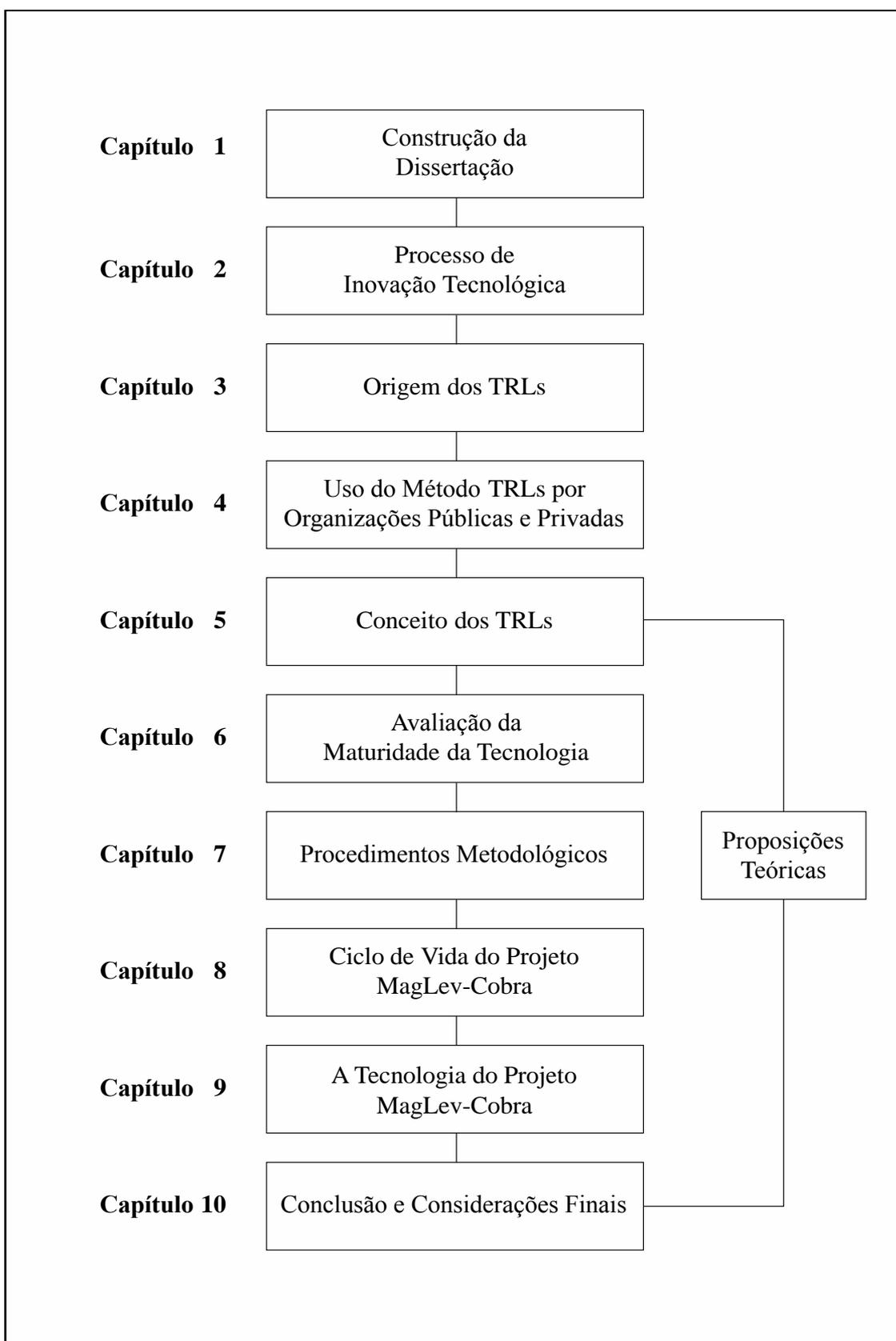
No capítulo 9, expomos um estudo sobre o ciclo de vida da tecnologia. Primeiro, efetuamos uma breve exposição sobre a tecnologia SML, com a finalidade de enquadrar o projeto MagLev-Cobra como um projeto de inovação. Em seguida, abordamos o ciclo de vida da tecnologia sob o enfoque da Curva-S para observar os estágios de maturidade da tecnologia com relação ao método TRLs. Por fim, buscamos enquadrar os quatro blocos de etapas da trajetória evolutiva do MagLev-Cobra no diagrama do ciclo de vida da tecnologia.

O capítulo 10 traz a conclusão desta dissertação, com uma reflexão sobre as proposições teóricas apresentadas no capítulo 1. Para encerrar o trabalho, apresentamos nossas considerações finais, com sugestões para estudos futuros acerca da avaliação da maturidade da tecnologia no projeto MagLev-Cobra sob o enfoque dos TRLs.

Para auxiliar a consulta ao texto, inclui-se, no fim, a lista dos autores que embasaram o estudo e os apêndices.

Segue o Quadro 1 sobre a representação da estrutura da dissertação.

Quadro 1 - Representação da estrutura da dissertação



Fonte: Elaborado pela autora

2 O PROCESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

Nesse capítulo, apresentaremos um panorama sobre o processo de inovação tecnológica para melhor compreender esse fenômeno e sua relação com o crescimento econômico. O objetivo é descrever o cenário no qual o projeto MagLev-Cobra evoluiu para conseguirmos visualizar as limitações enfrentadas pela equipe do Lasup durante o processo de desenvolvimento da tecnologia SML. Assim, traçaremos linhas gerais sobre temas inerentes à relação entre economia e inovação, conceito de inovação e seus indicadores de mensuração. Para situarmos esse processo no horizonte de nosso País, faremos uma breve exposição das políticas públicas, em especial sobre o novo marco legal da inovação. Em continuação, descreveremos uma noção geral sobre tecnologia no contexto da engenharia e terminaremos concluindo que nosso País precisa avançar em suas políticas públicas para que possamos promover o desenvolvimento econômico.

2.1 Relação entre economia e inovação

Todo país que busca o progresso depende de novas ideias que contestem *o status quo* e possibilitem mudanças e melhorias. Por essa razão, cada governo precisa definir sua política interna de fomento à inovação, construindo um sistema de normas, incentivos e programas eficazes que contemplem a possibilidade da participação conjunta dos setores público e privado no processo de desenvolvimento tecnológico. A inovação é, portanto, de suma importância para que organizações contemporâneas se adaptem a mercados e tecnologias em busca de constantes transformações que promovam o crescimento econômico.

Essa relação entre inovação e crescimento econômico está fundamentada na “Teoria do desenvolvimento econômico” defendida por Joseph Schumpeter (1982, p. 48), para quem o empreendedor busca a inovação e promove “ondas de destruição criativa” no capitalismo (MCCRAW, 2012, p. 77-82, 190-195). Como processo de destruição criativa, a inovação, especialmente a de base tecnológica, é capaz de alterar o *status* do sistema econômico e provocar mudanças radicais na natureza de produtos e processos, bem como em mercados e organizações (MCCRAW, 2012, p. 376-377, p. 381). Enfim, uma inovação pode alterar a estrutura da sociedade e, conseqüentemente, ocasionar transformações na vida das pessoas. Para Schumpeter (1982, p. 48-49), as

inovações radicais são cruciais porque produzem grandes impactos econômicos ou mercadológicos, enquanto as inovações incrementais são responsáveis pelos aprimoramentos técnicos de base contínua.

Quando o economista que popularizou a expressão destruição criativa desenvolveu sua teoria, não havia celular e muito menos internet. Não se tinha ideia de que o mundo se tornaria globalizado e caminharia para uma economia baseada em conhecimento, com milhares de inovações que transformariam radicalmente nosso modo de viver.

Schumpeter (1982, p. 48-50) foi pioneiro ao colocar a inovação no centro de sua teoria, considerando-a como o “fenômeno fundamental do desenvolvimento” no qual o progresso econômico está intrinsecamente relacionado a mudanças endógenas e descontínuas na produção de produtos e processos, além de métodos organizacionais e de *marketing*. A partir da “teoria schumpeteriana”, a inovação passou a ser vista como variável endógena, garantidora do desenvolvimento do sistema econômico. A Teoria do desenvolvimento econômico foi tão reveladora para o mundo que passou a ser utilizada para analisar todas as atividades relacionadas à inovação, fosse ela radical ou simplesmente incremental.

Seguindo os passos de Schumpeter, Mansfield (FURTADO, 2012) foi um dos economistas neoclássicos que estudou a fundo o processo de inovação, trazendo valiosas contribuições para o conhecimento na área. Sua principal contribuição foi a de desenvolver um método de pesquisa baseado no levantamento dos impactos econômicos da inovação. Com base em levantamentos de dados microeconômicos, Mansfield et al. (1977, apud FURTADO, 2012) mediram, pela primeira vez, a taxa de retorno de investimento privado e social em uma determinada tecnologia, considerando os resultados de 17 estudos de casos de indústrias norte-americanas de diversos setores. Com isso, ele criou um novo olhar sobre o fenômeno da inovação.

Nesse contexto, os economistas “neoschumpeterianos” formularam a “Teoria da economia evolutiva”, introduzindo na análise econômica conceitos das ciências biológicas fundamentados na teoria evolucionista de Charles Darwin, de 1859, para estabelecer uma consciência competitiva das organizações e garantir sua contínua existência. Segundo os “neoschumpeterianos”, a inovação representa o diferencial competitivo que determinará a existência ou o fim de uma empresa. Assim, a empresa que não investir em tecnologia estará fadada a sucumbir no mercado do qual faz parte

(NELSON; WINTER, 1982). Essa teoria estabelece não só uma relação entre tecnologia e desenvolvimento de produtos e inovação, como também a vincula ao desenvolvimento de processos evolutivos, permitindo, com isso, sua ligação com a ciência e a engenharia.

Uma consequência da “Teoria da economia evolutiva” é o estudo da inovação com base na abordagem de sistemas. A “Teoria das capacitações dinâmicas” estuda o modo como as organizações buscam, selecionam, configuram, implantam e aprendem sobre inovações. Sua base teórica está erigida na premissa de que a dinâmica da inovação depende não só dos recursos, mas também do processo de aprendizagem e transmissão da tecnologia, que deve ser sistêmico e cumulativo. Sua principal característica reside em explicar como as atividades técnico-científicas são incorporadas ao processo produtivo, e quais efeitos podem gerar nas organizações.

O foco está nas habilidades de identificar o processo de busca e seleção de inovações a partir de programas de investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) por empresas, universidades e centros de pesquisa, em conjunto ou separadamente, financiados por entidades públicas e privadas (DOSI, 1982; NELSON, 1993).

2.2 Conceito de inovação e seus indicadores

Essas teorias formam a base para a estrutura de mensuração da inovação, utilizada pela Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) em seu *Manual de Oslo*. Ordenado na forma de um guia, esse manual apresenta diretrizes sobre a coleta de dados para a mensuração do processo de inovação e suas implicações na formulação de políticas públicas de países membros e não membros. A primeira (1992) e a segunda (1997) edições do manual adotaram o conceito de inovação somente para Produtos Tecnológicos e Processos de Inovações (TPPI). A terceira e atual edição (2005) expandiu a definição para considerar inovação como:

[...] a implementação de um produto (bem ou serviço) novo ou significativamente melhorado, ou um processo, ou um novo método de marketing, ou um novo método organizacional nas práticas de negócios, na organização do local de trabalho ou nas relações externas (OCDE, 2005, p. 55, § 146).

Segundo o *Manual de Oslo* há, portanto, quatro tipos de inovação: (a) inovação de produto; (b) inovação de processo; (c) inovação organizacional e; (d) inovação de *marketing* (OCDE, 2005).

Alguns tipos de inovação estão diretamente associados à tecnologia. Vários autores empregam a expressão “inovação tecnológica” para designar “a inovação baseada na aplicação industrial do conhecimento científico e tecnológico” (ORTIZ CANTÚ; PEDROZA ZAPATA, 2006, p. 66, tradução nossa). Vale, contudo, ressaltar que apesar de ter expandido a definição de inovação, o *Manual de Oslo* manteve, em sua terceira edição, a noção de “inovação tecnológica” relacionada somente a produtos e processos, conforme já havia sido estabelecido nas edições anteriores. Todavia, o termo “tecnológica” foi removido da edição atual, com a inclusão do setor de serviços nas definições de inovações de produto e processo (OCDE, 2005, p. 24, § 35).

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com o apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), promove a cada três anos, em todo o território nacional, a Pesquisa de Inovação Tecnológica (Pintec). O objetivo dessa pesquisa é mensurar as atividades de inovação desenvolvidas em empresas industriais e em determinados serviços selecionados, compreendendo, entre outros, os dos setores de eletricidade e gás, telecomunicações, tecnologia da informação, pesquisa e desenvolvimento, arquitetura e engenharia. Desde a sua implementação, foram realizadas cinco edições – Pintec 2000 (1998-2000), Pintec 2003 (2001-2003), Pintec 2005 (2003- 2005), Pintec 2008 (2006-2008) e Pintec 2011 (2009-2011). Atualmente, o IBGE está implementando a sexta edição da Pintec, tendo 2014 como ano base (IBGE, 2015).

Seguindo as diretrizes estabelecidas na terceira edição do *Manual de Oslo*, a Pintec 2011 revelou queda na taxa geral de inovação na indústria brasileira, apontando uma estagnação dos investimentos em P&D quando comparados com o Produto Interno Bruto (PIB). Essa queda na taxa geral de inovação do setor industrial foi de 38,1%, no triênio 2006-2008, para 35,6%, no triênio 2009-2011 (IBGE, 2013; DE NIGRI; CAVALCANTE, 2013).

Com relação aos dispêndios de P&D, os gastos em atividades internas atingiram a cifra de R\$ 19,95 bilhões, enquanto os dispêndios com a aquisição externa de P&D foram da ordem de R\$ 4,29 bilhões. Somados, chegam à cifra de R\$ 24,24 bilhões; se comparado ao PIB, esse valor corresponde a 0,59%. A par de algumas modificações nos

critérios da pesquisa, os resultados da Pintec 2011 mostram um crescimento insignificante na relação entre P&D e PIB quando comparado com o resultado de 0,58% verificado na Pintec 2008 (IBGE, 2013; DE NIGRI; CAVALCANTE, 2013).

Os números apresentados pelo Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (Iedi) são ainda mais alarmantes. O estudo sobre o desempenho da indústria e da economia brasileira, em 2015, mostra que a indústria de alta tecnologia, categoria que abrange produtos farmacêuticos, de informática, eletroeletrônicos, bem como aparelhos médicos e de precisão apresentou retração de 19,8%. De fato, o resultado de 2015 evidencia ruptura no desempenho do setor da indústria de alta tecnologia, marcado por contração recorde, que arrastou consigo o desempenho geral da indústria de transformação cuja queda foi de 9,9% (IEDI, 2016).

Não se pode negar que as crises política e econômica vêm causando impactos significativos no desempenho da indústria, provocando queda do faturamento e, conseqüentemente, afetando diretamente os investimentos em P&D. Todavia, deve-se também admitir que os indicadores de desempenho da indústria de transformação, em especial os da inovação no Brasil, refletem um conjunto de fatores diretamente relacionados às características do setor, da infraestrutura da pesquisa científica e tecnológica e dos instrumentos legais utilizados para incentivar os esforços tecnológicos das empresas, além de sua interação com universidades e centros de pesquisa.

Há ainda entraves na economia brasileira que atuam como inibidores do processo de inovação: protecionismo, barreiras comerciais, restrita oferta de pesquisadores e de mão de obra qualificada, riscos financeiros e escassez de financiamentos, burocracia, política trabalhista, regulamentação tributária, dentre outros.

Porém, a análise dos indicadores de desempenho da indústria nacional (IEDI, 2016) mostra que a inovação tecnológica está longe de ser considerada fator determinante para promover crescimento econômico, estimular geração de emprego, aumentar renda e proporcionar bem-estar ao povo brasileiro. Esses resultados traduzem em números o baixo desempenho da economia e devem servir como referência para a reformulação de políticas públicas efetivamente voltadas para investimentos em P&D.

Nesse compasso, o Brasil ficou na 70ª colocação do Índice Global de Inovação em 2015, que classificou os 141 países. A pesquisa foi publicada no estudo sobre “A

efetividade das políticas de inovação e do ambiente de negócios para a competitividade”, feito pela Universidade de Cornell, em Nova Iorque (EUA), a Escola de Pós-Graduação em Negócios para o mundo (Insead), em Fontainebleau (FR), e a Organização Mundial da Propriedade Intelectual (Wipo), em Genebra, Suíça (DUTTA; LANVIN; WUNSCH-VINCENT, 2015).

Os resultados dessa pesquisa são reveladores. Na avaliação de 1 a 100 do Índice Global de Inovação 2015, o Brasil recebeu a pontuação de 34,95, o que representou queda de nove posições quando comparada ao ranking de 2014. Ao confrontar essa pontuação com a dos demais países da América Latina e do Caribe, percebe-se que o Brasil está atrás de Argentina, Chile e outros. Com relação ao Índice de Eficiência, encontra-se na 99ª posição e pode descer ainda mais na escala, em direção aos três dígitos, se a situação não for revertida (DUTTA; LANVIN; WUNSCH-VINCENT, 2015).

É certo que o Brasil apresentou algum avanço em suas políticas públicas de inovação tecnológica nas últimas décadas. Construiu um complexo sistema de apoio à Ciência e Tecnologia, com agências de fomento – como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) –, empresas públicas – como a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), bem como as Fundações de Amparo à Pesquisa (FAPs) –, universidades, centros e institutos de pesquisa. Além disso, o País criou uma série de incentivos fiscais, tais como subvenção ao crédito e fundos de financiamento, entre outros.

Nesse quadro, merecem também destaque a Lei nº 10.973/2004, conhecida como “Lei de Inovação”, e a Lei nº 11.196/2005, chamada “Lei do Bem”. A primeira estabelece as diretrizes gerais para o fomento das pesquisas científicas e tecnológicas, possibilitando a criação de ambientes voltados para a capacitação e formação de mão de obra especializada, e para promoção de interações entre universidades, empresas e governo em uma via de mão dupla. A segunda concede incentivos fiscais às empresas que investirem em pesquisa e desenvolvimento de inovação tecnológica (BRASIL, 2004, 2005).

De fato, as políticas públicas implementadas desde 2004 trouxeram alguns resultados positivos. A mensuração do impacto da produção científica mostra, por exemplo, que o Brasil ocupa a 13ª posição no *ranking* de 231 países pesquisados, com

57.033 documentos citados em 2015. Os resultados constam de pesquisa feita na base aberta de dados do Indicador SCImago de Ranking de Periódico e País (SJR), alimentada pela plataforma Scopus, da editora de revistas científicas Elsevier (SCIMAGO JOURNAL & COUNTRY RANK, 2007).

Esse sistema de incentivo à inovação permitiu a aproximação das universidades e dos institutos de pesquisa com o setor privado, potencializando os investimentos em P&D. Entretanto, as ações de fomento à inovação foram insuficientes para que o Brasil alcançasse países líderes ou mesmo igualasse o passo da Índia e da Coreia do Sul no desenvolvimento tecnológico. A aproximação das universidades e dos institutos de pesquisa com o setor privado foi positiva para a produção científica no Brasil, mas o conhecimento gerado não se converteu em inovação, como demonstram os indicadores acima apontados.

2.3 O novo marco legal da inovação

Para tentar reverter esse quadro, o Congresso Nacional aprovou a Emenda Constitucional (EC) nº 85, de 26 de fevereiro de 2015, visando reforçar ainda mais a atuação do Estado no campo da Ciência e da Tecnologia, ao inserir o termo inovação no texto da Constituição Federal. Com efeito, a Carta Magna, no Título VIII – Da Ordem Social, em seu Capítulo IV, passou a tratar da inovação com a ciência e a tecnologia, estabelecendo nos artigos 218 e 219 o dever do Estado de adotar políticas públicas destinadas a promover e incentivar não só o desenvolvimento científico, a pesquisa, a capacitação científica e tecnológica, mas também a inovação (BRASIL, 1988, 2015).

Nesse contexto, a Lei nº 13.243, de 11 de janeiro de 2016, conhecida como “Marco Legal da Ciência, Tecnologia e Inovação”, discutida com a comunidade científica e empresarial ao longo dos últimos cinco anos, alterou outras nove leis. Dentre elas, está a Lei de Inovação (Lei nº 10.973/2004) que dispõe sobre estímulos ao desenvolvimento científico, à pesquisa, à capacitação científica e tecnológica e à inovação, nos termos da citada EC nº 85/2015 (BRASIL, 2016).

Com efeito, o novo marco legal aperfeiçoou vários pontos da Lei nº 10.973/2004, buscando retirar os entraves burocráticos para facilitar a colaboração entre entidades públicas e privadas nas atividades de P&D. A nova norma também permite que os pesquisadores, em regime de dedicação exclusiva (DE) nas instituições públicas,

exercçam atividades remuneradas de ciência, tecnologia e inovação em empresas. Além disso, determina a dispensa de licitação pela Administração Pública para a contratação de bens e serviços destinados às atividades de P&D. O novo marco aprovou também a utilização do Regime Diferenciado de Contratações (RDC) para ações em órgãos e entidades dedicados à ciência, tecnologia e inovação, dentre outras medidas (BRASIL, 2016).

Cumprido ressaltar que a Lei nº 13.243/2016 alterou o conceito de inovação, estabelecido no inciso IV, do artigo 2º, da Lei nº 10.973/2004, dispondo o seguinte:

Art. 2º – Para os efeitos desta Lei, considera-se:

...

IV – inovação: introdução de novidade ou aperfeiçoamento no ambiente produtivo e social que resulte em novos produtos, serviços ou processos ou que compreenda a agregação de novas funcionalidades ou características a produto, serviço ou processo já existente que possa resultar em melhorias e em efetivo ganho de qualidade ou desempenho (BRASIL, 2016);

...

Entretanto, ao proceder à análise do conceito, percebe-se que o novo marco legal se distanciou do *Manual de Oslo*, adotando uma definição de inovação que não inclui a inovação de *marketing*, mas tão somente a organizacional, bem como a de produtos (bens e serviços) e de processos. Segundo o manual, inovação de *marketing* é:

[...] a implementação de um novo método de marketing com mudanças significativas na concepção do produto ou em sua embalagem, no posicionamento do produto, em sua promoção ou na fixação de preços.

Inovações de marketing são voltadas para melhor atender as necessidades dos consumidores, abrindo novos mercados, ou reposicionando o produto de uma empresa no mercado, com o objetivo de aumentar as vendas (OCDE, 2005, p. 59, §§ 169/170).

Essa diferença entre as definições adotadas na Lei nº 13.243/2016 e as utilizadas pelo IBGE para a Pintec, baseada no *Manual de Oslo* pode, a princípio, parecer insignificante, mas causa discrepância na interpretação das políticas públicas que precisam ser claras para que o País possa avançar em seu desenvolvimento econômico.

2.4 Noção de tecnologia

Outro ponto que merece destaque é o fato da Lei nº 13.243/2016 não definir, em seu Artigo 2º, o termo “tecnologia”, embora disponha sobre ela ao longo de todo o texto. Contudo, vale notar que o inciso XII, do referido Artigo 2º define a expressão

“extensão tecnológica” como a “atividade que auxilia no desenvolvimento, no aperfeiçoamento e na difusão de soluções tecnológicas e na sua disponibilização à sociedade e ao mercado” (BRASIL, 2016).

Embora o novo marco legal não adote uma definição de tecnologia capaz de direcionar as políticas públicas de inovação, serão apresentados a seguir, alguns conceitos tomados como referência para esta dissertação, considerando, contudo, que não existe consenso na literatura a respeito do assunto.

De acordo com a Nasa (2012b, p. 9, tradução nossa), a tecnologia deve ser entendida como “uma solução que resulta da aplicação das disciplinas da ciência da engenharia para sintetizar um invento, processo ou subsistema, a fim de permitir uma capacitação específica”.

Divergindo da corrente das “ciências da engenharia”, Proença Jr. e Silva (2016) afirmam que “engenharia não é ciência, nem mesmo ciência aplicada”. A engenharia tem uma dinâmica própria, cujo movimento do “saber-fazer” utiliza diferentes heurísticas em cada um de seus passos. Esse movimento do “saber-fazer”, ou melhor, o fluxo do conjunto de conhecimentos na engenharia começa com “uma demanda, pela sociedade, de mudança na realidade, que é traduzida como um problema, cujo encaminhamento é um determinado projeto, que pode ser uma solução” (PROENÇA JUNIOR; SILVA, 2016, p. 204-206).

Seguindo os passos de Koen (2003), Proença Jr. e Silva (2016, p. 206-212) entendem que a engenharia compreende “o uso de heurísticas para promover a melhor mudança numa situação pobremente entendida dentro dos recursos disponíveis”. Na visão dos autores, a engenharia não está voltada para a criação de um objeto, mas sim para a busca da “melhor solução” para um problema específico que se apresenta em um determinado momento do desenvolvimento de um projeto.

Não se pretende neste trabalho tratar da dicotomia entre ciência e tecnologia ou mesmo questionar se engenharia é ou não ciência. Ao assinalar as diversas correntes, procuramos entender a engenharia como um campo do saber, inclusive do “saber-fazer”, que abrange várias áreas interdisciplinares de concentração da ciência combinada com a engenharia. O objetivo nesta dissertação é construir um conhecimento que englobe tanto as ciências físicas e/ou matemática, como a aplicação prática da engenharia para a solução de problemas.

A engenharia surge, portanto, como um conjunto de conhecimentos, que não está necessariamente confinado a uma determinada ciência. Ela busca a criação e a otimização de soluções de engenharia por meio de maior compreensão e melhor aplicação de conhecimentos científicos, e princípios matemáticos e estatísticos integrados à engenharia. Ademais, a engenharia se propõe a preencher a lacuna entre a ciência teórica e a prática de engenharia, dando ênfase às atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D), bem como à análise de dados e ao *design*.

Antigamente, as tecnologias não costumavam ser desenvolvidas com base em princípios científicos, mas resultavam, na maioria das vezes, de princípios empíricos. Um exemplo clássico, muito conhecido por nós brasileiros, é o dos primeiros aviões. A par das discussões sobre quem são os autores da descoberta, aprendemos em livros, artigos, fotos e filmes sobre a inventividade e ousadia de Alberto Santos Dumont. Após inúmeras tentativas, ele voou a bordo de seu avião 14-Bis no Campo de Bagatelle, em Paris, França, em 1906 (BARROS, 2004, p. 80-82). Independentemente da genialidade do nosso “Pai da Aviação”, sabemos que os aviões foram desenvolvidos com base em testes de tentativa e erro. Em outras palavras, a ciência só alcançou essa tecnologia anos mais tarde, fornecendo uma moldura científica que permitiu o progresso tecnológico da aviação. Entretanto, hoje em dia, as tecnologias que se baseiam em princípios empíricos vêm se tornando cada vez mais raras. As tecnologias modernas tendem a ser baseadas em princípios científicos, erigidos tanto a partir da ciência teórica, como da ciência aplicada.

De acordo com a ciência da engenharia, a tecnologia deve ser entendida como a aplicação prática do conhecimento científico com o fim de criar uma capacitação específica para fazer algum artefato completamente novo ou fazer esse artefato de um modo todo novo. Desse modo, o processo de desenvolvimento de tecnologia diferencia-se da pesquisa científica e da engenharia. Por um lado, as ciências da natureza buscam a descoberta de um conhecimento novo, do qual uma nova tecnologia pode derivar. Por outro, a engenharia usa a tecnologia que provém desse novo conhecimento científico para solucionar problemas técnicos específicos.

Thiollent (2012) dá uma noção precisa do conceito de tecnologia ao conceber a diferença entre ciência e tecnologia, ensinando que:

Diferente da ciência pura, a tecnologia não possui o objetivo de compreensão ou de explicação do mundo. A partir de conhecimentos prévios de origem científica, da racionalização de técnicas anteriores e do senso comum, a tecnologia consiste, pela interação ensaio e erro da prática experimental, em conceber objetos técnicos que 'funcionam', isto quer dizer, objetos construídos e dotados de propriedades naturais e sociais artificialmente reproduzidas e capazes de alcançar determinados objetivos (THIOLLENT, 2012, p. 39-40).

Por essa razão, a especificidade da tecnologia dirigida a uma ação, ou seja, a capacidade de projetar objetos técnicos que funcionem, permite explorar as possibilidades da engenharia dos sistemas. Essa dimensão também propicia pensar a sistematização e a operacionalização do conhecimento tecnológico em compasso com a ação dos engenheiros, em uma interface entre sistema físico e sistema humano (THIOLLENT, 2012).

Para os filósofos da engenharia, a escolha da melhor solução é feita com base no “estado da arte”, que Koen (2003) chama de “sota”, para se referir a um conjunto de heurísticas associadas a um problema específico, examinado por um dado engenheiro, em um determinado momento do projeto (PROENÇA JUNIOR; SILVA, 2016, p. 206-207). O “sota” sofrerá modificações em razão da evolução da tecnologia e das mudanças no contexto em que ela foi desenvolvida. Proença Jr. e Silva (2016, p. 213-214) observam que, diferentemente do que ocorre na ciência pura, na engenharia, é o próprio engenheiro quem propõe as questões pelas quais busca avançar no conhecimento. “Sua prioridade é resolver o problema que tem diante de si para desenvolver seu projeto e produzir a mudança na realidade, para estar, de fato, ‘fazendo engenharia’”.

Bartholo Junior (2013a) ensina que todo projeto de P&D se caracteriza como “um processo alquímico, no sentido de que o engenheiro realiza pesquisa e desenvolvimento de tecnologia ao mesmo tempo que constrói o seu aprendizado”. Para o professor, esse aprendizado é eminentemente artesanal, mas não avesso à técnica; “embora exija o uso de tecnologia de ponta, o projeto de P&D é único, singular, e requer uma aprendizagem não seriada”.

Projetos que envolvem a construção de um ônibus espacial ou um trem de levitação magnética supercondutora são exemplos de projetos únicos, que requerem um processo de aprendizagem artesanal e exigem o desenvolvimento de tecnologias avançadas.

Assim, para desenvolver um projeto de P&D, o engenheiro precisa ter uma postura ousada e criativa. Como pesquisador, ele deve estar focado em aumentar a fronteira do conhecimento; como desenvolvedor de tecnologia, precisa estar disposto a intervir na realidade. “Não basta observar um objeto, seguir regras e executar procedimentos padrões. É preciso saber contemplar, dar um passo adiante, criar novos significados, mas não apenas dar um significado novo ao objeto já observado” (BARTHOLO JUNIOR, 2013b).

Watanabe (2008, 2012) acrescenta que não basta resolver problemas – o engenheiro deve ser capaz de formular perguntas novas e buscar novos saberes. Para o Diretor da Coppe, “a formação de futuros pesquisadores não será atingida apenas com o ensino” (WATANABE, 2008, p.1). As novas descobertas estão no conjunto de conhecimentos que “sabemos que não sabemos” e o que “nem sabemos que não sabemos” (WATANABE, 2008, p. 4; 2012).

Tetlay e John (2009, p. 1) apontam que o século XXI tem sido chamado de “o século dos sistemas” em razão do aumento da complexidade e da alta integração de produtos tecnológicos. Sistemas complexos envolvem múltiplas tecnologias, que precisam ser implementadas e integradas antes de serem introduzidas em um produto. Logo, projetos de desenvolvimento de produtos que envolvem múltiplas tecnologias não podem ser feitos isoladamente. As decisões sobre se o produto está pronto ou não para uso devem ser tomadas levando em consideração a complexidade dos sistemas, incluindo não só o conhecimento sobre a tecnologia, mas também as incertezas e os riscos a ela associados.

De Meyer, Loch e Pich (2002) classificam quatro níveis diferentes de incertezas e apresentam perspectiva única de gestão de projetos para cada uma delas. São eles: (**a**) incerteza variante; (**b**) incerteza previsível; (**c**) incerteza imprevisível⁵; e (**d**) caos. Os autores, primeiro, propõem traçar um perfil das incertezas identificáveis em um projeto para, depois, determinar a abordagem de gestão, planejamento e execução.

Em projetos de P&D, novos produtos e processos são criados com tecnologias estabelecidas e com uma quantidade substancial de novas tecnologias. Assim, o desenvolvimento de tecnologias tem, em geral, alto grau de incertezas e riscos a elas associados. Um fator determinante no nível de incerteza está relacionado à falta de

⁵ Em inglês, a expressão também é conhecida como “*unknown unknowns*” ou, de forma abreviada, “*unk-unks*”.

conhecimento sobre a prontidão da tecnologia. Quanto maior o nível de incerteza, menor a prontidão da tecnologia.

O perfil das incertezas de um projeto pode ajudar a antecipar resultados, gerenciar riscos, prevenir desastres, evitar perda de prazos, aumento de custos, comprometer especificações ou até mesmo impedir que o projeto morra. Quanto maior o número de tecnologias, maior será o nível de incertezas sobre o sucesso do projeto. Assim, além de entender as características e especificidades, o pesquisador precisa conhecer também o impacto que as incertezas relacionadas às novas tecnologias possuem sobre o sucesso do projeto. Desconsiderar as incertezas geralmente acarreta práticas de gestão de projetos que contribuem para aumentar os problemas em vez de solucioná-los.

Bilbro (2007b) explica que o desenvolvimento de tecnologias requer que o pesquisador se aventure no mundo do desconhecido, para além da capacidade de fazer julgamentos baseados em sua experiência de vida. É justamente nesse mundo do desconhecido – como sinaliza Watanabe (2008, p. 4; 2012), do “sabemos que não sabemos” e “nem sabemos que não sabemos” ou, ainda, como classificam De Meyer, Loch e Pich (2002, p. 62), de “incertezas imprevisíveis” e “caos” –, que reside a falta de prontidão da tecnologia.

3 A ORIGEM DOS NÍVEIS DE PRONTIDÃO DE TECNOLOGIA

Este capítulo 3 dará início à revisão da literatura sobre o método TRLs. Para uma melhor compreensão sobre o assunto, fomos buscar a origem da criação dessa ferramenta, situando-a no contexto histórico. O propósito deste capítulo é examinar como a Política Nacional Espacial norte-americana marcou o desenvolvimento tecnológico naquele país. Com isso, investigaremos como e em que medida as iniciativas políticas e melhores práticas propiciaram o ambiente necessário para que a Nasa viesse a criar os TRLs. Assim, abriremos este capítulo com um estudo sobre o surgimento do conceito de prontidão de tecnologia nos anos de 1960 e 1970. Em seguida, analisaremos o desenvolvimento da escala TRLs na década de 1980 e avançaremos sobre a história para traçar o caminho de consolidação do método na década de 1990. Por fim, buscamos alinhar em linhas gerais a disseminação do método TRLs a partir do ano 2000.

3.1 O surgimento dos TRLs nas décadas de 1960 e 1970

A origem dos TRLs remonta ao fim dos anos 60, quando surgiu na Nasa a necessidade de se aferir o *status* de novas tecnologias projetadas para possível uso em programas de sistemas espaciais (MANKINS, 2009b). Como naquela época a Nasa possuía pouca tecnologia espacial para aplicar em seus projetos, contava essencialmente com seu Programa de Pesquisa e Tecnologia Espacial (*Space Research and Technology Program*) para atender às demandas das novas missões.

O desenvolvimento de uma tecnologia, geralmente, trilhava o caminho de uma falha, seguida por um bem-sucedido remodelamento, ou poderia evoluir de um projeto de pesquisa e tecnologia capaz de render alguns notáveis sucessos na primeira tentativa. As missões de voos espaciais, tais como Explorer e Apollo, são exemplos de programas de sistemas que geraram grande quantidade de ativos de tecnologias espaciais inteiramente novos (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989). Os avanços tecnológicos eram, portanto, criados para satisfazer requisitos previamente estabelecidos pelos novos programas de voos espaciais.

A partir de práticas então estabelecidas para verificar a prontidão de voos de espaçonaves, os engenheiros da Nasa foram construindo a ideia de estabelecer práticas para avaliar, também, o nível de prontidão de uma nova tecnologia antes dela ser integrada a um sistema espacial. Mankins (2002, 2009b) afirma que a expressão revisão da prontidão de tecnologia (*technology readiness review*) passou a ser empregada como um corolário às práticas de revisão da prontidão de voo (*flight readiness review*), e é encontrada em um relatório da Nasa, datado de 1969, que descrevia os requisitos de tecnologia avançada para estações espaciais.

Cabe aqui um parêntesis para situarmos o surgimento do conceito TRLs no tempo e no espaço, assinalando que, em 20 de julho de 1969, o astronauta Neil Armstrong pisou pela primeira vez na Lua, marcando o feito na história da humanidade com a frase célebre: “um pequeno passo para um homem, um salto gigante para a humanidade” (ERTEL; NEWKIRK; BROOKS, 1978).



Figura 2- Foto de uma das marcas de pegadas deixadas em solo lunar.

Fonte: Crédito: Nasa / Buzz Aldrin. Photo ID: Nasa - AS11-40-5877. Essa é uma imagem da marca de pegada do astronauta Buzz Aldrin na lua durante a missão Apolo 11. Aldrin fotografou sua pegada enquanto realizava investigações sobre a mecânica do solo da superfície lunar junto com o astronauta Neil Armstrong, em atividade lunar extra veicular, em 20 jul. 1969. Esta foto se tornaria mais tarde sinônimo da aventura da humanidade no espaço (tradução nossa). Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apollo_11_bootprint.jpg#metadata>. Acesso em 28 jan. 2016 (figura adaptada).

Embora, naquela época, todos os principais objetivos da missão Apolo 11 tivessem sido alcançados com sucesso, muitas dificuldades ainda estavam por vir. Em 3 de dezembro de 1969, o Centro Marshall de Voo Espacial (*Marshall Space Flight*

Center – MSFC) produziu um relatório sobre a crescente insatisfação de cientistas com o programa espacial. A origem principal da insatisfação residia nas complexas interfaces entre os departamentos de Ciência, de Engenharia e de Gestão de Programas e Projetos da Nasa, e destes com os órgãos governamentais (ERTEL; NEWKIRK; BROOKS, 1978).

Assim, no fechamento da década de 60, os cientistas da Nasa estavam relutantes em aceitar o longo período de tempo, e a burocracia administrativa existente, desde o processo de concepção do projeto até o recolhimento de dados dos resultados de experimentos espaciais, que duravam um período de seis a dez anos. Essa insatisfação não se resumia apenas a questões como falta de continuidade do financiamento do projeto ou de apoio ao estudante de pós-graduação. Muitas vezes, a pesquisa científica tornava-se obsoleta com o longo período de espera. Muitos cientistas, dentro e fora da Nasa, sugeriram que a administração fosse reestruturada e que fosse criado um departamento com funções para agir em nome dos cientistas que participavam dos programas espaciais (ERTEL; NEWKIRK; BROOKS, 1978).

Nos anos 70, a insatisfação dos cientistas persistiu. Os ativos até então gerados pela Nasa passaram a ser explorados pelos gerentes de missões, que usavam fundos financeiros dos programas para adaptar e requalificar tecnologias armazenadas nas “prateleiras” da agência espacial à medida que surgiam as demandas dos projetos. Essas atividades foram realizadas pelo Programa de Pesquisa e Tecnologia de Apoio (*Supporting Research and Technology Program – SRT*). Em contrapartida, o Programa de Pesquisa e Tecnologia Avançada (*Advanced Research and Technology Program – ART*) pretendia perseguir novos conceitos, que também poderiam atender aos procedimentos de qualificação por meio dos programas de missão. Embora possuíssem muitos avanços tecnológicos que possibilitavam o sucesso de missões importantes, os cientistas encontravam barreiras para que novas tecnologias fossem implementadas nos sistemas utilizados em missões de voos espaciais (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; MANKINS, 2002, 2009b).

Isso ocorria porque, segundo Sadin, Povinelli e Rosen (1989), pesquisadores e planejadores de missões da Nasa divergiam sobre os requisitos, especialmente os que definiam a verificação requerida e os que determinavam a prova efetiva da prontidão de uma nova tecnologia. Muitas vezes, esse foi o que provocou a desistência da aplicação da nova tecnologia ou de sua não transferência do Programa ART para os usuários do

Programa SRT. Além disso, havia pouco incentivo aos gerentes de projetos de voos espaciais para que aplicassem novas tecnologias consideradas insuficientemente demonstradas, em especial quando existiam alternativas seguras já comprovadas (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; NRC, 1993; MANKINS, 2002, 2009b).

Nesse contexto, o Departamento de Aeronáutica e Tecnologia Espacial da Nasa (*NASA Office of Aeronautics and Space Technology – OAST*) identificou a necessidade de se estabelecer uma escala independente para avaliar tecnologias. Em 1974, o então pesquisador e vice-diretor do OAST, Stanley Sadin elaborou a primeira escala dos níveis de prontidão de tecnologia para uso interno. Ela atuava como uma ferramenta capaz de dar suporte à avaliação da maturidade de determinada tecnologia, bem como à comparação consistente dos níveis de prontidão de diferentes tipos de tecnologias aplicadas em sistemas espaciais (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; MANKINS, 2002, 2009b; BANKE, 2010).

Segundo Mankins (2009b), a escala original foi concebida como parte do esforço para conscientizar os engenheiros da Nasa sobre a necessidade de criarem uma métrica independente, que tivesse uma abordagem sistemática e servisse como base para firmar um entendimento comum entre pesquisadores, gerentes de pesquisa dos programas ART e SRT e gerentes dos programas de voo de missões espaciais. Nessa época, o OAST emitiu um catálogo, somente para uso interno, denominado “Modelo de tecnologia de sistemas espaciais da Nasa” (*NASA Space systems technology model*), que servia como referência para orientar o desenvolvimento tecnológico de sistemas e programas futuros da agência (NASA, 1980; MANKINS, 2009b).

Cumprido, entretanto, observar que encontramos divergências entre autores sobre os níveis estabelecidos na primeira versão da escala TRLs. Enquanto Banke (2010) afirma que a escala TRLs possuía sete níveis, Mankins (2009b) assevera que as primeiras versões dessa escala variavam entre seis e sete níveis. Porém, existe consenso entre os autores de que essa métrica, em princípio, era considerada rudimentar – cada nível era caracterizado por um título de uma linha que o identificava com relação à evolução de uma tecnologia. Sadin, Povinelli, e Rosen (1989) informam que os níveis variavam entre o mais baixo, TRL 1, no qual são definidos os princípios básicos observados e relatados, até o mais alto, à época considerado como TRL 7, usado para avaliar a maturidade de uma nova tecnologia mediante validação de sua aplicação em um sistema no espaço.

3.2 A criação da escala TRLs na década de 1980

Em maio de 1980, o OAST emitiu a segunda edição do “Modelo de tecnologia de sistemas espaciais da Nasa” (*NASA Space Systems Technology Model*). Essa nova versão, com três volumes, continha informações sobre requisitos de sistemas e programas da Nasa, tendências tecnológicas e previsões em tecnologia espacial. O modelo, que mais se assemelhava a um catálogo, era utilizado como referência para projetos e programas de sistemas espaciais (NASA, 1980).

Vale registrar que o volume I desse modelo, em sua parte C, possuía um quadro dos dados sobre tendências em tecnologia exigidas pelos sistemas e programas da Nasa. Esse quadro continha uma coluna denominada “Data de prontidão da tecnologia” (*Technology readiness date*), demonstrando que, à época, a expressão era aceita e usada extensivamente pela agência (NASA, 1980).

Entretanto, a década de 80 foi marcada pelo terrível acidente com o ônibus espacial Challenger, interrompendo o programa da Nasa por um período de aproximadamente 32 meses, além de causar grande impacto sobre a organização dos programas da agência nas décadas seguintes. Há 30 anos, mais precisamente em 28 de janeiro de 1986, o ônibus espacial explodiu no ar após o lançamento da missão STS 51-L, causando a morte dos sete tripulantes que estavam a bordo, incluindo a professora do ensino fundamental Christa McAuliffe, primeira civil a participar de um voo espacial (NASA, 2011b).

O desastre com o Challenger teve grande repercussão não só nos Estados Unidos, mas também no mundo todo, principalmente na comunidade científica. As causas do acidente foram investigadas por uma comissão presidencial, denominada Comissão Rogers e uma parlamentar, nomeada pelo Congresso norte-americano. Ambas concluíram que houve falha de comunicação sobre defeito no equipamento e no processo de controle de qualidade da fabricação das peças da espaçonave (UNITED STATES, 1986; NASA, 2011b).

Segundo o relatório da Comissão Rogers, durante a fase de decolagem, ocorreu falha em uma anilha de borracha (*O-ring*) usada para a vedação do lado direito do foguete propulsor de combustível sólido (*solid rocket booster*). A anilha de borracha apresentava anomalias na expansão quando a temperatura chegava a 0°C (ou 32°F). Com a baixa temperatura que fazia na Flórida no dia 28 de janeiro de 1986, esse anel de

vedação endureceu, acarretando a separação do anexo do lado direito do foguete propulsor e a falha estrutural do tanque de combustível externo, provocando a explosão do Challenger. Com isso, forças aerodinâmicas rapidamente destruíram a nave, que se desintegrou caindo sobre o Oceano Atlântico (UNITED STATES, 1986). Foram apenas 73 segundos após a decolagem do Challenger.

Em seu relatório, a Comissão Rogers apontou diversos processos de gestão do Programa de ônibus espaciais da Nasa como decisivos para a contribuição do acidente, atribuindo responsabilidade a algumas causas, como falha no *design* da peça, falta de testes do material utilizado e problemas de comunicação entre vários departamentos da Nasa, entre outras. Para os membros da comissão investigativa, os gestores do programa sabiam, desde 1977, que os motores dos foguetes fabricados pela empresa contratada continham possível falha nas anilhas de borracha. Porém, continuaram promovendo missões espaciais sem conseguir resolver o problema corretamente. Além de ignorá-lo, os gerentes também desconsideraram os avisos dos engenheiros sobre os perigos de lançamento da Challenger naquela manhã do dia 26 de janeiro de 1986, devido às baixas temperaturas, deixando de informar esses riscos e as preocupações técnicas a seus superiores hierárquicos (UNITED STATES, 1986; NASA, 2011b).

No início dos anos 80, com o fim do Programa Apollo, a Nasa passou a sofrer cortes no orçamento, o que fez seus programas e projetos enfrentarem atrasos e aumentos de custos significativos. Muitos dos problemas vivenciados àquela época pelos engenheiros da Nasa eram atribuídos ao nível de imaturidade das tecnologias requeridas, que impediam a correta previsão dos custos e do cronograma de tempo de execução de programas e projetos.

Foi exatamente nesse cenário de cortes no orçamento, aumento de custos e perdas de prazos que os Estados Unidos promoveram uma profunda revisão em sua Política Nacional Espacial (*National Space Policy*), vindo a definir a importância do desenvolvimento de tecnologias. Tudo isso levou a Nasa a assumir o compromisso de reconstruir sua base tecnológica com a elaboração de novos programas focados em tecnologia (*focused programs*) para desenvolver missões de exploração da Lua, de Marte e de outros planetas. Desse processo, emergiu o conceito dos TRLs (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; BILBRO, 2007b).

Em 20 de julho de 1989, o então presidente dos Estados Unidos, George W. Bush, anunciou o Plano de Iniciativa de Exploração Espacial (*Space Exploration*

Initiative – SEI). Esse plano serviu para que o Conselho Nacional Espacial (*National Space Council – NSC*) determinasse o que seria necessário, em termos de recursos financeiros, humanos e tecnológicos, para levar adiante as missões espaciais e promover o retorno de humanos à Lua, bem como a ida a Marte (DICK, 2010).

Nesse contexto, os níveis de prontidão tecnológica (TRLs) foram primeiramente documentados em artigo escrito por Sadin, Povinelli e Rossen (1989), intitulado “NASA technology push towards future space mission systems”. O artigo marca uma mudança expressiva na abordagem da Nasa com relação ao desenvolvimento de tecnologias que, anteriormente, era visto apenas como uma atividade de apoio. Essa mudança tem sua origem na revisão da política nacional espacial, que reconheceu a responsabilidade dos programas de tecnologia para moldar o futuro daquele órgão da administração norte-americana.

A nova abordagem propiciou reavaliação do processo de desenvolvimento e infusão de tecnologias de forma mais sistemática, buscando aumentar a probabilidade de sucesso das missões espaciais. A primeira escala TRLs, oficialmente descrita no citado artigo, possuía sete níveis que traçavam a evolução do processo de maturação de uma tecnologia, desde a observação e o relato dos princípios básicos até a validação do sistema no espaço (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; BILBRO, 2007b; MANKINS, 2009b; BANKE, 2010).

Embora a escala TRLs com sete níveis tenha sido formalmente divulgada em artigo científico por engenheiros do OAST, naquele mesmo ano de 1989 mais dois níveis foram acrescentados à escala TRLs (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; MANKINS, 2009b; BANKE, 2010). No contexto do SEI, a escala TRLs passou, então, a incluir os níveis oito e nove, em razão da necessidade de divulgar o *status* de uma grande variedade de novas tecnologias, além de estabelecer maior interação entre comunidades de pesquisadores e de planejadores de missão com relação às previsões feitas para o uso das tecnologias desenvolvidas pela Nasa (MANKINS, 2009b).

No fim de 1989, os Estados Unidos lançaram, então, sua Política Nacional Espacial, que promovia a reestruturação das atividades espaciais. Além disso, a Nasa apresentou ao Conselho Nacional Espacial relatório sobre estudo elaborado em 90 dias a respeito da exploração humana da Lua e de Marte (NASA, 1989). O documento apresentava abordagens de desenvolvimento de tecnologias, missões espaciais e exploração do espaço por humanos, estimando custos para o programa de

aproximadamente US\$ 500 bilhões de dólares norte-americanos (NSC, 1990; NSC, 1991; DICK, 2010).

Como o custo do programa era excessivamente alto, a Nasa não conseguiu o apoio do Congresso norte-americano e, muito menos, de parceiros internacionais. Com isso, o então presidente George W. Bush estabeleceu um comitê para traçar recomendações ao programa espacial do país. O Comitê consultivo sobre o futuro do programa espacial norte-americano, constituído de 12 especialistas, presidido por Norman Augustine, emitiu relatório final em 17 de dezembro de 1990 (NSC, 1990).

Esse documento, conhecido como “Relatório Augustine” (*Augustine Report*), apontava que a Nasa deveria manter o foco nas ciências espaciais e da Terra enquanto fazia a transição para a exploração humana do espaço, com uma estratégia para cobrir os custos à medida que os recursos se tornassem disponíveis. Ademais, o relatório expressou a preocupação de que a falta de um programa de pesquisa e desenvolvimento adequado poderia fazer os Estados Unidos perderem sua primazia tecnológica. A Recomendação nº 8, por exemplo, sugeria que a Nasa expandisse suas atividades de desenvolvimento tecnológico alinhada aos objetivos das missões espaciais, estabelecendo que os programas espaciais apresentassem um plano de tecnologia revitalizado e devidamente financiado (NSC, 1990, p. 32).

Nesse passo, os administradores da Nasa abandonaram o plano de exploração humana além da órbita da Terra e passaram a dar ênfase à estratégia de gestão conhecida como mais rápida, melhor e mais barata (*Faster, better, cheaper management – FBC*), retomando projetos de inovação aplicados à exploração robótica na ciência espacial (NSC, 1990; DICK, 2010).

Naquela época, havia, portanto, um esforço por parte dos engenheiros da Nasa para criar melhores práticas de gestão de projetos com ênfase na transferência de tecnologias avançadas, desde a fase de pesquisa básica, passando pela maturação, até sua aplicação nas futuras missões espaciais (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989).

3.3 A consolidação do método TRLs na década de 1990

Na década de 90, a Nasa reviu os TRLs como originalmente concebidos, consolidando sua metodologia de avaliação de tecnologia. Assim, a escala TRLs passou

a ser largamente adotada pelos engenheiros da Nasa para avaliar e divulgar o *status* de grande variedade de novas tecnologias (MANKINS, 2009b).

Em 1991, o OAST elaborou o Plano de Tecnologia Integrada para o Programa Espacial Civil (*Integrated Technology Plan for the Civil Space Program*– ITP) em resposta às recomendações expressas no Relatório Augustine. O objetivo do ITP era servir de plano estratégico para o programa de pesquisa e tecnologia espacial do OAST, bem como de modelo para o planejamento estratégico de outros departamentos da Nasa e de participantes norte-americanos na defesa e realização de empreendimentos tecnológicos que apoiassem futuras missões civis espaciais do país (NASA, 1991a;NRC, 1993).

Nesse sentido, a Nasa estabeleceu os nove níveis como estratégia para avaliar o processo de maturação de tecnologias espaciais. Geralmente, o objetivo do programa de pesquisa resumia-se a desenvolver uma tecnologia até o nível cinco de prontidão, caracterizado como a validação de componente ou placa de ensaio em um ambiente de teste relevante (incluindo o espaço). Porém, com a nova estratégia do ITP, a maturação dessa tecnologia só poderia ser plenamente alcançada com a conclusão de um sistema de “voo comprovado” (*flight proven*) no programa de operações em missões bem-sucedidas, ou seja, o nível nove (NASA, 1991a; NRC, 1993).

Mankins (2009b) observa que todo o processo de planejamento que resultou no ITP envolveu mais de cem pessoas e de mil homens-horas de trabalho. Os trabalhos empregaram a recém-expandida escala TRLs de nove níveis para coordenar todas as avaliações e previsões das tecnologias que integravam a base do plano. Em consequência, no início dos anos 90, diversos documentos espelhos e relatórios sobre esse plano foram produzidos pelo Departamento de Ciência Espacial (*Office of Space Science* – OSS) da Nasa, empregando de forma extensiva à escala TRLs. Diante desses fatos, Mankins (2009b) concluiu que, pela primeira vez, uma organização científica utilizou a escala TRLs como instrumento não só para gerenciar o desenvolvimento de tecnologias, como também para se comunicar de forma mais eficaz com pesquisadores e organizações, dentro e fora da Nasa (NRC, 1993).

Em 1991, o Departamento de Aeronáutica, Exploração e Tecnologia (*Office of Aeronautic, Exploration and Technology* – OEAT) e o OAST prepararam o Plano estratégico para o programa de transporte de tecnologia (*Transportation Technology Program*), como parte integrante do ITP e em atendimento às recomendações do

Relatório Augustine. O objetivo desse plano estratégico era o de definir o programa de tecnologia necessário ao atendimento das demandas de transporte de pesquisas tecnológicas em missões espaciais (NASA, 1991b).

Muitas das propostas tecnológicas identificadas no plano exigiam a execução de testes em ambiente relevante no espaço (TRL 6) para que pudessem fornecer aos gerentes de programa o nível necessário de confiança antes da tecnologia ser integrada a um sistema. Os testes efetuados no espaço, com as experiências feitas em bancadas de ensaio no solo, serviam para preencher a lacuna entre a pesquisa científica e os programas de voo e, como tal, demonstrar o desempenho da tecnologia e reduzir os riscos programáticos. Para tanto, esse plano estratégico definia os nove níveis TRLs como passos do processo de maturação de tecnologia. Os níveis eram, então, mapeados para as áreas de responsabilidade dentro da Nasa, estabelecidas pela estratégia de maturação de tecnologia da Nasa, conforme definida pelo ITP (NASA, 1991b).

Assim, o Programa de Pesquisa e Tecnologia Espaciais (*Space Research and Technology Program – Space R&T*) da Nasa foi reestruturado e passou a conter dois importantes tipos de P&D de tecnologia espacial: um denominado Programa Base de Pesquisa e Tecnologia Espaciais (*Base Research and Technology Program – Base R&T*), que tratava de pesquisas voltadas para o resultado ou atividades direcionadas a oportunidades tecnológicas; e outro, conhecido como Programa Focado de Pesquisa e Tecnologia Espaciais (*Focused Space Research and Technology Program – Focused R&T*), dirigido para atender às necessidades identificadas pelos planejadores de missões espaciais civis (NASA, 1991a).

Um dos pontos relevantes desse plano consistia na estratégia de gestão de seus programas. No Base R&T, a Nasa conduzia disciplinas orientadas para atividades que empurravam a tecnologia, a fim de permitir que missões candidatas e planejadas pudessem alcançar capacitação de sistemas, confiabilidade e eficiência de custo. Pesquisas em aerodinâmica, propulsão de jato e conversão de energia espacial, entre outras, eram consideradas atividades que atraíam oportunidades. Já os programas focados puxavam a tecnologia para responder aos requisitos dos principais programas de voo. Pesquisas nas áreas de transporte espacial, plataformas (satélites) orbitando a Terra e exploração de superfície planetária, entre outras, eram desenvolvidas por programas impulsionados para atender às necessidades das missões de avanços tecnológicos (NASA, 1991a; NRC, 1993).

Logo, os primeiros níveis de maturação da tecnologia (TRL 1, TRL 2e TRL 3) eram conduzidos pelo Base R&T, de modo a empurrar (*push*) a tecnologia para seu desenvolvimento, buscando novas capacitações. As atividades nesses níveis eram consideradas preliminares, pois não estavam focadas em uma necessidade específica e imediata de algum departamento da Nasa. Ao contrário, o Base R&T apenas antecipava necessidades tecnológicas futuras para vários programas da Nasa (NASA, 1991a, 1991b).

À medida que a tecnologia amadurecia, poderia ser encaminhada para o programa focado, de modo a puxar (*pull*) a tecnologia para que seu desenvolvimento fosse voltado ao atendimento de uma necessidade definida por um departamento da Nasa. O passo seguinte no processo de maturação de tecnologia foi traçado pelo plano estratégico. Considerado pelo OAET como o mais difícil de ser executado, compreendia construir uma ponte entre a responsabilidade de seu Programa de Transporte de Pesquisa e Tecnologia e a responsabilidade do programa do departamento usuário. A intenção era conseguir que a tecnologia estivesse madura o suficiente (TRL 8 e TRL 9) para ser utilizada em uma linha principal de um programa de voo real (NASA, 1991b).

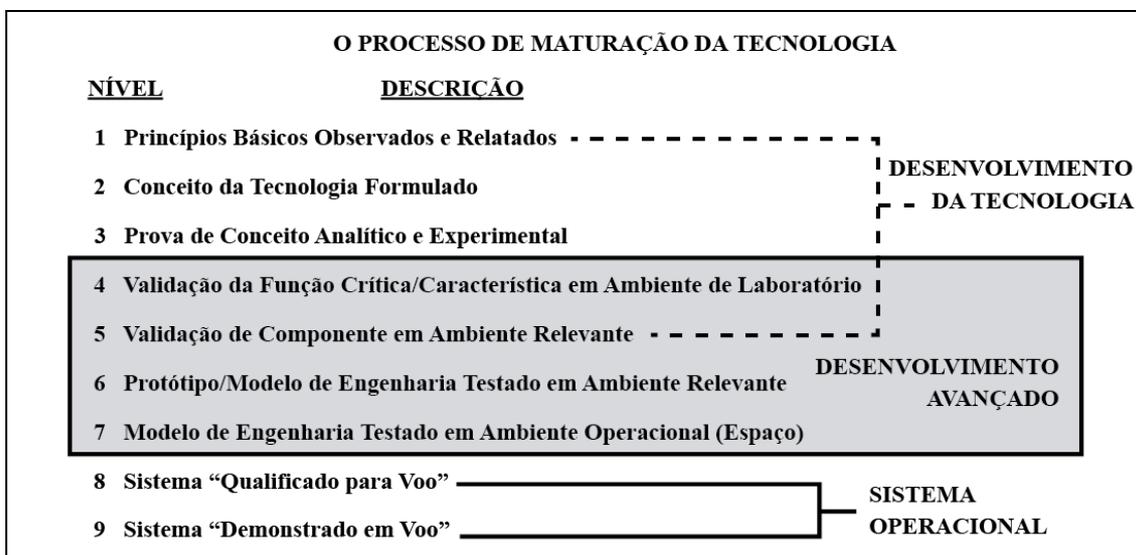


Figura 3 - O processo de maturação de tecnologia descreve os nove níveis TRLs, reproduzidos no Plano Estratégico do Programa de Transporte de Tecnologia da Nasa.

Fonte: Traduzida e adaptada (NASA, 1991b).

A propósito, apresentamos a Figura 4.

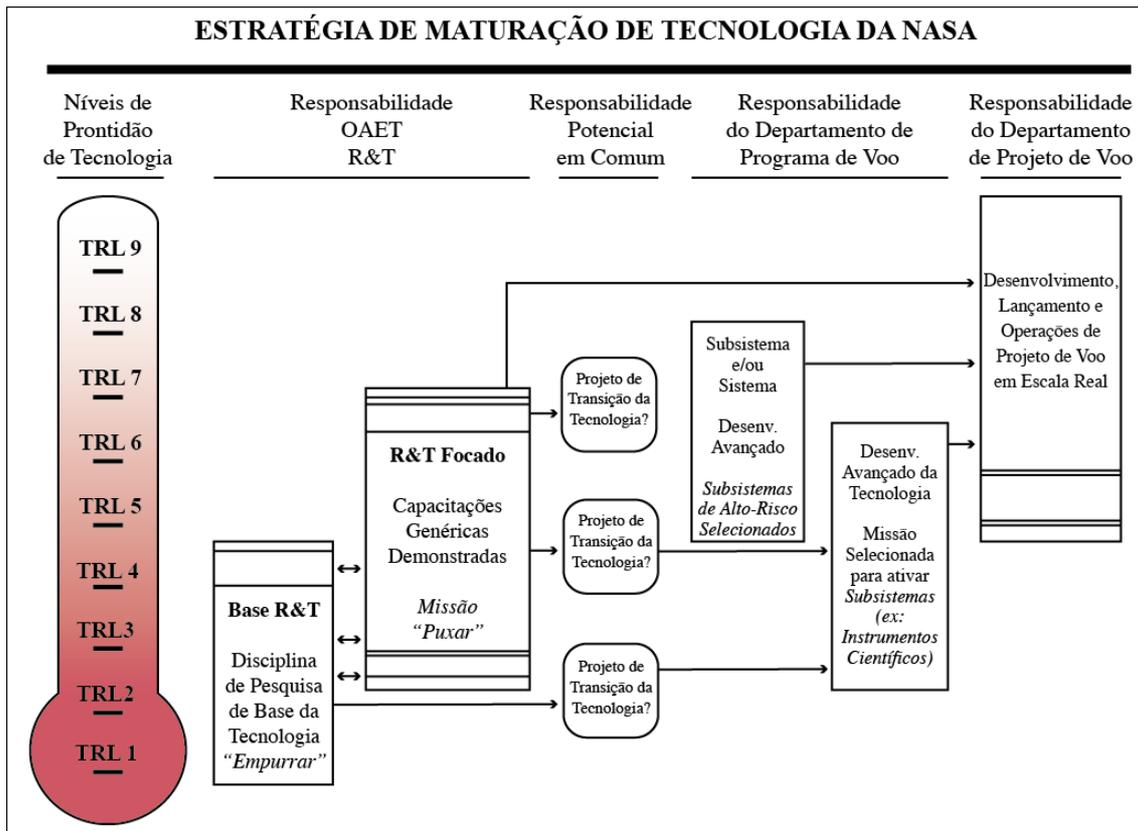


Figura 4 - A estratégia de maturação de tecnologia da Nasa mostra os nove níveis da escala TRLs mapeados por áreas de responsabilidade.

Fonte: Traduzida e adaptada (NASA, 1991b).

Como se pode notar nas Figuras 3 e 4, os primeiros níveis de desenvolvimento de tecnologia (TRL 1 a TRL 3) ficavam a cargo do Base R&T. Conforme a tecnologia ia amadurecendo (TRL 4 a TRL 7), era encaminhada ao programa focado, passando depois para a etapa operacional, na qual a tecnologia precisava estar totalmente integrada a um sistema real, capaz de ser lançado e operado com sucesso (TRL 8 e TRL 9) (NASA, 1991b).

Nos anos seguintes, a Nasa incorporou a abordagem TRLs em suas Instruções de Gerenciamento (*NASA Management Instructions*– NMI 7100). Em 6 de abril de 1995, Mankins (1995) redigiu um relatório oficial da Nasa, intitulado “Technology Readiness Levels: a white paper”, contendo um conjunto abrangente de definições dos TRLs. Esse “Relatório branco” é utilizado até hoje como referência para ajudar os engenheiros da Nasa na tomada de decisão sobre o desenvolvimento de tecnologias usadas nos programas espaciais (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Nesse contexto, nasceu Mars Pathfinder, o primeiro programa focado da Nasa a completar uma missão planetária. Desenvolvido sob a estratégia de gestão FBC, pelo

Laboratório de Propulsão a Jato da Nasa (*Jet Propulsion Laboratory – JPL*), gerenciado pelo Instituto de Tecnologia da Califórnia (*California Institute of Technology – Caltec*), Mars Pathfinder foi o segundo projeto do Programa Discovery, que promoveu o envio de naves de baixo custo e de lançamentos frequentes ao espaço. O ciclo de desenvolvimento do projeto teve um cronograma de tempo de duração de três anos (1993–1996), e orçamento inicial estimado em aproximadamente 150 milhões de dólares norte-americanos (ano fiscal de 1992) (NASA, 1997).

A missão Mars Pathfinder foi inicialmente projetada com o objetivo específico de demonstrar a engenharia de tecnologias e conceitos-chave empregando uma sonda (*lander*) e um veículo robótico de exploração (*rover*). Lançada em 4 de dezembro de 1996, a sonda pousou em Marte em 4 de julho de 1997, sendo a primeira de uma série de missões a Marte que incluiu um veículo robótico equipado com um conjunto de instrumentos científicos para analisar a atmosfera, o clima, a geologia, bem como a composição das rochas e do solo daquele planeta (NASA, 1997).



Figura 5 - Foto do veículo robótico de exploração Sojourner em Marte.

Fonte: Nasa Digital. Fotógrafo/Criador: Nasa. Figura adaptada. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/redplanet/sojourner.html>>. Acesso em: 18 out. 2015.

O projeto de engenharia superou as expectativas dos engenheiros da Nasa. A sonda funcionou por quase três vezes seu período de vida de 30 dias, e o veículo robótico Sojourner operou 12 vezes seu período de vida de sete dias. Desde a sua aterrissagem até a última transmissão de dados, em 27 de setembro de 1997, Mars Pathfinder enviou para a Terra 2,3 bilhões de *bits* de informações, incluindo mais de 16.500 imagens da sonda, 550 imagens do veículo e mais de 15 análises químicas de rochas e solo, além de dados extensos sobre ventos e outros fatores climáticos. Essa

bem-sucedida missão foi considerada pela Nasa como encerrada em 10 de março de 1998 (NASA, 2016).

Desse modo, no fim da década de 90, a escala TRLs teve grande aceitação na Nasa, especialmente nas áreas de pesquisas em inovação tecnológica. Os engenheiros passaram a usar esse método como métrica sistemática para avaliar a maturidade de uma tecnologia e permitir comparações consistentes do desenvolvimento de diferentes tipos de tecnologias. Os resultados foram tão significativos que os TRLs começaram a se disseminar: primeiro, para outras instituições públicas norte-americanas; em seguida, para empresas, universidades e organizações públicas e privadas além das fronteiras norte-americanas.

A própria Força Aérea dos Estados Unidos também adotou, com grande sucesso, a metodologia da Nasa em seus programas. O relatório de conclusões e recomendações, conduzido pelo Comando de Comunicações Eletrônicas (*Communications Electronics Command* – Cecom) do Exército norte-americano, informa que, em 1999, a Força Aérea dos Estados Unidos passou a adotar a abordagem TRLs. William Nolte, do Laboratório de Pesquisa daquela Força Aérea (*Air Force Research Laboratory* – AFRL), desenvolveu uma calculadora TRLs tanto para *hardware* como para *software*, conhecida como Calculadora AFRL TRL (GRAETTINGER et al., 2002; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003; NOLTE, 2008).

Em 1999, a Agência de Controladoria Geral dos Estados Unidos (U.S. Government Accountability Office – GAO)⁶ emitiu relatório no qual analisava 23 tecnologias desenvolvidas em projetos de empresas comerciais para o Departamento de Defesa (DOD). Concluiu que o uso de tecnologia imatura aumentava o risco global dos programas daquele departamento, demonstrando, com isso, ser necessário adotar nova abordagem de gestão que separasse a fase de desenvolvimento da tecnologia e a fase de desenvolvimento do produto. A GAO, então, recomendou ao DOD que adotasse o método TRLs da Nasa ou que criasse abordagem própria de gestão, similar à da Nasa,

⁶ A GAO (U. S. Government Accountability Office) é uma agência independente e não partidária, responsável por fornecer ao Congresso norte-americano auditorias financeiras, avaliações de desempenho e serviços de contabilidade em investigações sobre os gastos de recursos públicos. Fonte: GAO. Disponível em: <<http://www.gao.gov/about/index.html>>. Acesso em: 4 maio 2016.

Alguns autores associam a GAO a nossa Controladoria Geral da União (CGU), o que não nos parece correto. A CGU é órgão do Governo Federal, responsável por assistir direta e imediatamente ao presidente da República em assuntos do âmbito do Poder Executivo, relativos à defesa do patrimônio público e ao incremento da transparência da gestão, por meio de atividades de controle interno, auditoria pública, correição e combate à corrupção. Fonte: CGU. Disponível em: <<http://www.cgu.gov.br/sobre/institucional>>. Acesso em: 4 maio 2016.

como meio de avaliar a maturidade da tecnologia antes de avançar para a fase seguinte de transição, ou seja, de desenvolvimento do produto. Ademais, sugeriu que o DOD passasse a exigir que tecnologias-chave alcançassem um nível alto de prontidão (TRL 7) antes de iniciar a fase de desenvolvimento de sistemas, a fim de ajudar a garantir o sucesso da implementação de novas tecnologias nos programas de aquisição de armamento (UNITED STATES, 1999).

Mankins (2009b) alega que o “Relatório branco” da Nasa, de 1995, serviu de base para a avaliação e as recomendações feitas pelo GAO a respeito dos programas de tecnologia do DOD, em julho de 1999.

3.4 A disseminação do método TRLs

A partir de 2000, normas, regulamentos, orientações e guias passaram a estabelecer o método TRLs como parte do processo de avaliação da tecnologia em projetos e programas de P&D. Diversas organizações adotaram formalmente a escala TRLs da Nasa ou desenvolveram metodologia semelhante.

Alguns dos usuários do método de avaliação de tecnologia empregam o método TRLs exatamente como foi concebido pela Nasa, enquanto outros o modificaram para melhor atender a suas características e necessidades. Há, ainda, aqueles que desenvolveram guias e ferramentas para ajudar na avaliação de suas tecnologias, tanto sob o enfoque do método TRLs da Nasa como mediante a aplicação dos Níveis de Prontidão de Tecnologia com outros métodos de avaliação. Órgãos como Departamento de Defesa, Departamento de Energia, Departamento de Segurança Interna e Força Aérea dos Estados Unidos, entre outros, adotam uma versão dos TRLs modificada para atender às exigências de seus programas. Agências espaciais internacionais, como a ESA e seus contratantes, também utilizam substancialmente os TRLs na forma como concebido pela Nasa.

A comunidade acadêmica nos Estados Unidos e demais países, especialmente os da Europa, abraçaram o método TRLs. Com o uso extensivo dessa escala em programas de pesquisas científicas e tecnológicas espalhados pelo mundo, a literatura produziu, com base na ferramenta da Nasa, uma série de métricas para avaliar os riscos associados ao desenvolvimento de tecnologias e de sistemas complexos.

Métricas, como Níveis de Prontidão de Sistemas (*System Readiness Levels – SRL*), Níveis de Prontidão de Manufatura/Produção (*Manufacturing Readiness Levels – MRL*), Níveis de Prontidão de Integração (*Integration Readiness Levels – IRL*), entre outras, foram criadas como métodos para complementar os TRLs ou como ferramentas para fornecer novos meios de avaliar a maturidade de uma tecnologia. Esse passo foi de grande importância para aproximar as universidades das agências governamentais e das empresas, que passaram a atuar, de forma mais efetiva, em parcerias voltadas para o incremento de pesquisas científicas e tecnológicas (QUINTERO; FALASCONI; JOVANOVIC, 2014; SAUSER et al., 2006; MORGAN, 2008).

Ocorre, entretanto, que em 1º de fevereiro de 2003, o ônibus espacial Columbia explodiu no ar, desaparecendo dos radares da Nasa enquanto sobrevoava, em alta altitude, o estado do Texas durante o seu retorno à Terra. Columbia foi o primeiro de uma série de cinco ônibus espaciais reaproveitáveis (Challenger, Discovery, Atlantis e Endeavour), do Programa de Ônibus Espaciais da Nasa (*NASA Space Shuttle Program*). Esse Programa tinha como objetivo fazer os voos espaciais se tornarem lançamentos rotineiros e economicamente mais viáveis. O Columbia foi lançado em 16 de janeiro de 2003 para a missão STS-107, com duração de 16 dias, ao longo dos quais cumpriu com sucesso as cerca de 80 experiências científicas no espaço. Era o 28º voo desse ônibus espacial, e o 113º voo do Programa de Ônibus Espaciais da Nasa (NASA, 2003, 2011a).

O acidente com o Columbia ocorreu 17 anos após o acidente com o ônibus espacial Challenger e, de acordo com os requisitos da Nasa, uma comissão de investigação foi nomeada logo após a perda de sinal da espaçonave. A comissão era formada por 13 membros, sendo quatro professores das universidades de Stanford, George Washington, Califórnia (em San Diego) e do Instituto de Tecnologia de Massachusetts que, com os demais membros, contaram com o apoio de 120 colaboradores e 400 engenheiros da Nasa. Após sete meses de investigação sobre as causas do acidente, a comissão identificou uma série de ações – uma física e outras organizacionais, que levaram à perda do Columbia e de sua tripulação (NASA, 2003).

Quanto à causa física, o acidente com o Columbia foi atribuído a uma fissura no sistema de proteção térmica na ponta da asa esquerda, ocasionada por um pedaço de espuma isolante que se separou do tanque externo em 81,7 segundos após o lançamento. Quando o Columbia reentrou na atmosfera, em seu retorno à Terra, a fissura no sistema de proteção térmica permitiu que o ar superaquecido penetrasse através do isolamento e

derretesse, progressivamente, a estrutura de alumínio de sua asa esquerda. Isso resultou em seu enfraquecimento até que crescentes forças aerodinâmicas causassem a perda de controle, a desintegração da asa e, conseqüentemente, o desmantelamento do veículo orbital com o colapso da espaçonave (NASA, 2003).

Porém, a comissão de investigação não ficou satisfeita em apenas analisar a causa física e foi buscar, na raiz dos problemas, as causas organizacionais que contribuíram para o acidente. Apontou, entre outras questões, limitações de recursos, mudanças de prioridades e, principalmente, descaracterização do Programa de Ônibus Espaciais, que deixou de ser um programa de desenvolvimento de tecnologia e passou a ser gerido apenas como um programa operacional para viagens espaciais rotineiras.

A comissão de investigação também apontou traços culturais e práticas organizacionais prejudiciais à segurança, tais como confiança excessiva no sucesso do passado, que levou à dispensa de testes para verificação do funcionamento dos sistemas de acordo com os requisitos; falhas na comunicação eficaz de informações críticas de segurança; divergências profissionais; falta de gestão integrada; além da evolução de uma cadeia informal de comando e processos de tomada de decisão que operava fora das regras organizacionais (NASA, 2003, 2011a).

Em sua declaração final, a Comissão concluiu que a perda do Columbia, a 16 minutos do horário previsto para sua aterrissagem, comprovou que os voos espaciais ainda estão longe de se tornarem rotineiros. Programas de desenvolvimento de tecnologia, como os de voos espaciais, envolvem um elemento substancial de risco que não pode ser ignorado (NASA, 2003).

Assim, a partir de 2000, a escala TRLs passou a ser adotada mundo afora, vindo a mudar a forma de olhar para o processo de desenvolvimento de tecnologias e, conseqüentemente, contribuir significativamente em sua avaliação. Hoje em dia, não se discute mais sobre a necessidade ou não de se avaliar a maturidade de tecnologias durante o ciclo de vida de um projeto de P&D. Os TRLs tornaram-se uma realidade (MANKINS, 2002, 2009b; BILBRO, 2007b; AZIZIAN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009; RAMIREZ-MARQUEZ; SAUSER, 2009).

Atualmente, os programas/projetos de P&D de diversas agências, órgãos governamentais, universidades, institutos e empresas de tecnologia, no mundo todo, enfrentam o desafio de estabelecer a métrica que melhor reflita a maturidade de uma

tecnologia e/ou de um sistema por eles desenvolvido. A proposta é a de sempre tentar diminuir os riscos relacionados a custo, cronograma de tempo, desempenho, operabilidade e aquisição, o que pretendemos mostrar adiante.

O Quadro 2, a seguir, apresenta a evolução dos níveis de prontidão de tecnologia, mediante comparação entre a primeira versão da escala de TRLs de 1989, com sete níveis; a versão expressa no “Relatório branco” de 1995, com nove níveis; e a versão em vigor, também com nove níveis, estabelecida nos “Requisitos e procedimentos de engenharia de sistemas da Nasa – NPR 7123.1B” (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; MANKINS, 1995; NASA, 2013).

Quadro 2 - Evolução dos Níveis de Prontidão de Tecnologia

TRL	ESCALA de 1989 SADIN; POVINELLI; ROSEN. OAST/NASA	ESCALA de 6 abr. 1995 RELATÓRIO BRANCO – MANKINS, J.	ESCALA EM VIGOR NPR 7123.1B, 18 abr. 2013, APÊNDICE E.
1	Princípios básicos observados e relatados.	Princípios básicos observados e relatados.	Princípios básicos observados e relatados.
2	Aplicação potencial validada.	Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados.	Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados.
3	Prova de conceito demonstrada, analítica e/ou experimentalmente.	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característico.	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característico.
4	Componente e/ou placa de ensaio validado em laboratório.	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente de laboratório.	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente de laboratório.
5	Componente e/ou placa de ensaio validado em ambiente espacial – real ou simulado.	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente relevante.	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente relevante.
6	Sistema adequado validado em ambiente simulado.	Demonstração de modelo ou protótipo do sistema/subsistema em um ambiente relevante (solo ou espaço).	Demonstração de modelo ou protótipo do sistema/subsistema em um ambiente relevante.
7	Sistema adequado validado no espaço.	Demonstração de protótipo do sistema em um ambiente espacial.	Demonstração de protótipo do sistema em um ambiente operacional.
8	-	Sistema real concluído e “qualificado para voo” por meio de teste e demonstração (solo ou espaço).	Sistema real concluído e “qualificado para voo” por meio de teste e demonstração.
9	-	Sistema real “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida.	Sistema real “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida.

Fonte: Elaborado pela autora. (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989; MANKINS, 1995; NPR 7123.1B, 2013, tradução nossa).

4 O USO DO MÉTODO TRLs POR ORGANIZAÇÕES PÚBLICAS E PRIVADAS

Neste capítulo 4, faremos uma breve exposição sobre o uso do método TRLs por organizações públicas e privadas. Assim, examinaremos como esse método passou a fazer parte das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento de tecnologia, vindo, posteriormente, a ser regulamentado em normas e procedimentos da Nasa, DOD, ESA, bem como de universidades, institutos de tecnologia e organizações privadas. No Brasil, em especial, traçamos breves linhas sobre a regulamentação dos TRLs pela ABNT e a formalização do uso da escala pela Embrapii.

4.1 Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço dos Estados Unidos (Nasa)

Na Nasa, o método TRLs se entranhou por todo o corpo organizacional. Os níveis de prontidão de tecnologia foram amplamente abordados em planos, manuais, guias e requisitos. Seu uso passou a ser exigido não só para avaliar a maturidade de uma tecnologia, como também para qualificar e analisar propostas, solicitações e documentos necessários à implementação de programas e projetos desenvolvidos pela agência.

Em dezembro de 2007, a Nasa reeditou seu “Manual de engenharia de sistema” (*NASA Systems Engineering Handbook*), versão atualizada da edição de 1995 e da minuta de 1992, para incluir normas da Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization – ISO*), bem como analisar o resultado de missões fracassadas e lições aprendidas em programas e projetos. Essa nova edição, ainda em vigor, manteve a filosofia original das versões anteriores, mas buscou atualizar o corpo de conhecimento sobre engenharia de sistemas gerado na Nasa, fornecer diretrizes para seu pessoal sobre as melhores práticas correntes e alinhar o manual com a nova política da agência (NASA, 2007).

Em 2010, após a reestruturação da Política Nacional Espacial norte-americana, a Nasa passou a trabalhar intensamente com a academia, indústrias e parceiros, nacionais e internacionais, na implementação de um novo plano de desenvolvimento de tecnologias, com o objetivo de expandir as oportunidades para a realização de

atividades espaciais futuras. Assim, com base nas novas diretrizes, a agência espacial norte-americana começou a traçar seu Plano de Investimento Estratégico em Tecnologia Espacial (*The NASA Strategic Space Technology Investment Plan – SSTIP*), finalizado em 2012, depois da definição de uma série de roteiros para seus projetos.

Esses roteiros de tecnologia espacial (*space technology roadmaps*) compreendem 14 planos para guiar o desenvolvimento de tecnologias nos próximos 20 anos (NASA, 2012b). Em maio de 2015, a Nasa lançou nova versão, expandida e atualizada, dos roteiros, que contêm 16 áreas de tecnologias candidatas e metas de desenvolvimento para os próximos 20 anos (2035) priorizadas no Plano SSTIP (NASA, 2015).

Com efeito, o SSTIP determina que a Nasa passe a equilibrar seus investimentos entre todas as tecnologias espaciais desenvolvidas nas áreas demarcadas nos roteiros, abrangendo indistintamente todos os níveis de prontidão, do TRL 1 ao TRL 9. Além disso, o plano também fixa a aplicação de pelo menos 10% do investimento total da Nasa em tecnologias com baixo nível de prontidão (TRL 1 e TRL 2), a fim de garantir que os projetos sejam continuamente reabastecidos. O SSTIP traz um resumo dos investimentos efetuados em tecnologias consideradas pioneiras e transversais. Considerando o valor de US\$ 1 bilhão de dólares norte-americanos investidos no ano fiscal de 2012, a Nasa registrou que 8% dos recursos foram destinados à projetos de tecnologias em TRL 1; 10% em TRL 2; 36% em TRL 3; 24% em TRL 4; 19% em TRL 5; 3% em TRL 6; e 0,1% em TRL 7 (NASA, 2012b).

Segue o Gráfico 1.

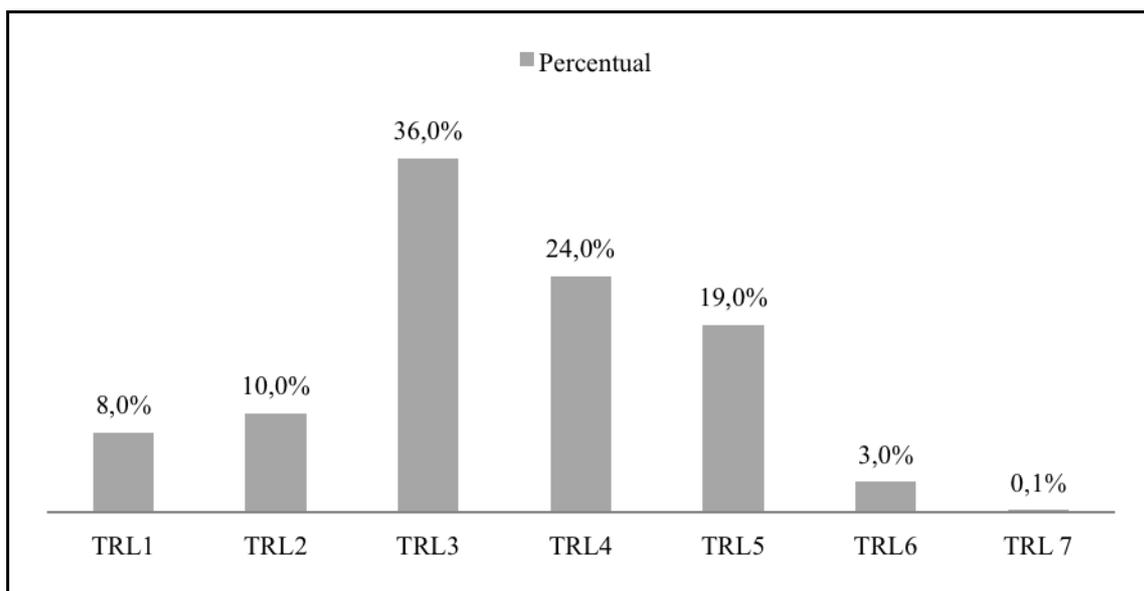


Gráfico 1 - Relação de investimentos efetuados pela Nasa, no valor de US\$ 1 bilhão de dólares norte-americanos, em tecnologias pioneiras e transversais por nível de TRLs, durante o ano fiscal de 2012 dos Estados Unidos.

Fonte: Quadro traduzido e adaptado (NASA, 2012b).

Em 2012, o MSFC editou seu “Manual de gestão de projeto e de engenharia de sistemas” (*Project management and systems engineering handbook – MSFC-HDBK-3173*), que descreve processos básicos e fornece orientação geral para a gestão do ciclo de vida de seus programas, bem como a execução dos processos de gestão e dos sistemas de engenharia realizados em seus projetos. A gestão do ciclo de vida dos programas é dividida entre os projetos de desenvolvimento de sistemas de voo espacial e os projetos de desenvolvimento de tecnologia, formalmente conhecidos como projetos de Desenvolvimento de Tecnologia Avançada (*Advanced Technology Development – ATD*) (NASA, 2012a).

Para os projetos de sistemas de voo espacial, o manual do MSFC mantém os procedimentos de Revisão da Prontidão de Voo (*Flight Readiness Review*), que deram origem à expressão Revisão da Prontidão da Tecnologia (*Technology Readiness Review*), a qual contribuiu para a concepção do método TRLs. Porém, não obstante a distinção feita entre os dois tipos de projetos, o MSFC estabelece em seu manual que a escala TRLs seja utilizada extensivamente nos processos de gestão de ciclo de vida não só para avaliar a prontidão de tecnologias em projetos específicos de desenvolvimento de tecnologia, mas também em diversas etapas de projetos de sistemas de voos espaciais. Logo, a escala TRLs é proposta ao longo de todo o manual do MSFC, em

conformidade com os Requisitos de Gestão de Programa e Projeto de Pesquisa e Tecnologia da Nasa – NPR 7120.8 (NASA, 2008; NASA, 2012a).

Esses requisitos estabelecem o processo pelo qual a Nasa formula e implementa programas e projetos de pesquisa e tecnologia por ela gerenciados e financiados, de acordo com o modelo de governança contido em sua Política Diretiva (*NASA Policy Directive* – NPD 1000.0), e consubstanciada em seu “Manual de gestão e governança estratégica” (*NASA strategic management and governance handbook*). Tais requisitos sofreram três alterações. A última, em 18 de abril de 2013, retirou de seu Apenso J a versão antiga dos TRLs, atualizados e incorporados ao Apenso E da NPR 7123.1B, que se refere a requisitos e procedimentos de engenharia de sistemas da Nasa (NASA, 2013).

Como regra mandatória, esses requisitos apontam os TRLs como um método de avaliação bem-sucedido, a ser usado em revisões de implementação e acompanhamento de programas. Com isso, a norma utiliza explicitamente os nove níveis da escala da Nasa, e inclui em seu Apenso E uma versão contendo um quadro da escala TRLs, com definições para *hardware* e *software*, bem como descrições dos critérios de saída de cada nível (NASA, 2013).

4.2 Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DOD)

Em consequência da recomendação do relatório da GAO (UNITED STATES, 1999), o DOD adotou formalmente o método de avaliação da prontidão de tecnologia em seus programas. Normas e regulamentos, bem como orientações e guias provisórios, estabelecem a avaliação da prontidão de tecnologia como princípio de melhores práticas de gestão aplicáveis aos processos de sistemas, que passaram a ser usados pelos programas do DOD para aquisição de defesa e também pelas empresas que com ele contratam.

Assim, a partir do ano 2000, o processo de avaliação da prontidão de tecnologias foi regulamentado pela Diretiva DODD nº 5000.1, denominada Sistema de Aquisição de Defesa (*Defense Acquisition System*), e pela Instrução DODI nº 5000.2, intitulada Operação do Sistema de Aquisição de Defesa (*Operation of the Defense Acquisition System*) (UNITED STATES, 2000, 2002a, 2002b, 2015a). Em memorando datado de 15 de julho de 2001, o subsecretário adjunto de Defesa para Ciência e Tecnologia dos

Estados Unidos determinou que os oficiais militares da área de ciência e tecnologia passassem a realizar uma avaliação do nível de prontidão das tecnologias críticas, identificadas nos principais programas de aquisição de defesa, antes do início das fases de desenvolvimento de engenharia, fabricação e produção dos sistemas de aquisição de defesa (UNITED STATES, 2002b; GRAETTINGER *et al.*, 2002).

O título 10 do Código dos Estados Unidos dispõe sobre os principais programas de aquisição de defesa (*Major Defense Acquisition Programs* – MDAP) e os principais sistemas de informação automatizados (*Major Acquisition Information Systems* – MAIS). A seção 2366b estabelece que o DOD apresente ao Congresso norte-americano a certificação de que a tecnologia a ser desenvolvida nos MDAP tenha sido demonstrada em um ambiente relevante (TRL 6), antes do início da fase de desenvolvimento e fabricação do sistema de armas (UNITED STATES, 2009).

Apesar do código exigir essa certificação somente para os MDAP, o DOD requer que as tecnologias desenvolvidas pelos programas MAIS também sejam comprovadas com a mesma padronização de prontidão (TRL 6). Assim, a escala TRLs da Nasa forma a base da matriz da metodologia do DOD de avaliação da prontidão da tecnologia, cuja legislação complementar exige que o TRL 6 ou, preferencialmente, o TRL 7, seja alcançado antes da tecnologia desenvolvida pelo programa ser utilizada no desenvolvimento e na fabricação de um sistema de aquisição de defesa.

Em 2003, o DOD desenvolveu uma cartilha para avaliação da prontidão da tecnologia (*DOD Technology Readiness Assessment Deskbook*), fundamentada na Diretiva DODD nº 5000.1 e na Instrução DODI nº 5000.2, ambas de 12 de abril de 2003, bem como no Guia Provisório de 30 de outubro de 2002. A cartilha compreendia um compêndio detalhado de procedimentos e requisitos para a avaliação de prontidão de tecnologia (*technology readiness assessment* – TRA) nos programas de sistemas de aquisição de defesa, aplicando a versão DOD do método TRLs (UNITED STATES, 2003b). Essa cartilha está em sua quarta edição, tendo sido atualizada em 2005, 2009 e 2011 (UNITED STATES, 2003b, 2005, 2009, 2011).

Embora mantivesse a mesma numeração de série, o DOD promoveu revisões periódicas de diretrizes, instruções, guias e demais requisitos, cujos textos foram atualizados para atender às exigências dos programas de aquisição de sistema de defesa dos Estados Unidos. A Diretiva DODD nº 5000.01, de 12 de maio de 2003, foi

certificada como atual a partir de 20 de novembro de 2007, e a Instrução nº 5000.02 foi revista em 7 de janeiro de 2015 (UNITED STATES, 2003, 2015a).

Do mesmo modo, uma nova versão do “Guia de aquisição de defesa” foi emitida em 16 de setembro de 2013, como complemento da Diretriz nº 5000.01 e da Instrução nº 5000.02, servindo como um manual discricionário de melhores práticas para a execução dos aludidos programas (UNITED STATES, 2013).

4.3 Agência Espacial Europeia (ESA)

A ESA editou, em setembro de 2008, seu “Manual de níveis de prontidão de tecnologia para aplicações no espaço” (*Technology readiness levels handbook for space applications*), com o objetivo de fornecer definições claras dos TRLs e orientar avaliações de maturidade tecnológica (ESA, 2008).

O manual da ESA estabelece procedimentos padrões a serem seguidos para que uma tecnologia seja enquadrada em determinado nível de TRL. Além de apresentar definições detalhadas de cada um dos TRLs, esse manual enumera uma série de questões-chave a serem respondidas, bem como de evidências apropriadas a serem requeridas para dar suporte à avaliação da maturidade tecnológica. A ESA expõe também, em separado, como Apêndice A de seu manual, orientações para definição dos níveis de prontidão de tecnologia de *software* e inclui tabela específica, que contém um resumo de definições e princípios descritos nas orientações (ESA, 2008).

4.4 Universidades e institutos norte-americanos

A metodologia TRLs vem sendo utilizada em universidades e institutos de tecnologia norte-americanos como objeto de estudos em dissertações, teses, artigos científicos, seminários e conferências, mas também como ferramenta para ajudar na avaliação da maturidade de tecnologias desenvolvidas em projetos de pesquisas científicas e tecnológicas, muitos deles, inclusive, em parceria com a Nasa.

A título ilustrativo, o Departamento de Aeronáutica e Astronáutica da Escola de Engenharia, do Instituto de Tecnologia de Massachussetts (MIT), tem um Laboratório de Propulsão Espacial e um Laboratório de Sistemas Espaciais, entre outros, que desenvolvem pesquisas em parceria com a Nasa para demonstrar a maturação de tecnologias espaciais. Ademais, a Escola de Administração Sloan do MIT está

desenvolvendo pesquisa sobre a aplicação prática dos TRLs em seu estado da arte, cujos levantamentos (*surveys*) foram efetuados em julho de 2015. A intenção é coletar dados sobre as indústrias e os desafios por elas enfrentados ao aplicar os TRLs no desenvolvimento de tecnologias (INCOSE, 2016).

Já o Laboratório de Propulsão a Jato (*Jet Propulsion Laboratory – JPL*) é uma unidade de pesquisa e desenvolvimento da Nasa, gerenciada pelo Caltec. Considerado um dos principais centros de pesquisa dos Estados Unidos, o JPL desenvolve para a Nasa projetos voltados para a exploração robótica do sistema solar, como o veículo robótico Sojourner, usado na missão Mars Pathfinder (NASA, 1997, 2016).

4.5 Demais organizações públicas e privadas

Desde que foi formalmente adotada pela Nasa nos anos 90, o método TRLs passou a ser utilizado por entidades públicas e por organizações privadas, tais como as que atuam nos setores de segurança, aviação comercial, equipamentos pesados, óleo e gás, sistemas e eletrônicos.

Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) apontam, em seus estudos, que empresas – por exemplo, Raytheon, Bombardier, John Deere, British Petroleum, Alstom, e Google – utilizam os TRLs como ferramenta de suporte da avaliação da maturidade de tecnologias e, com isso, tentam mitigar possíveis riscos no desenvolvimento de novos produtos ou serviços. Os pesquisadores do MIT e da Universidade de Boston entrevistaram diversos gerentes de projetos, *designers* de sistemas e executivos técnicos dessas empresas e verificaram que eles enfrentam uma série de desafios ao aplicarem a ferramenta TRLs em projetos de inovação.

Um desses desafios diz respeito à inserção da tecnologia no sistema – uma das principais causas de atraso no cronograma de tempo e extrapolação do orçamento do projeto. Um engenheiro da Bombardier, por exemplo, explicou em entrevista aos pesquisadores que, embora não tivesse problemas em usar os TRLs conforme a metodologia clássica desenvolvida pela Nasa, aviões a jato comerciais e aeronaves executivas são particularmente produtos integrados. Portanto, a inserção de tecnologias novas é uma questão de suma importância para a indústria de aviação comercial (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015).

Outros desafios apontados pelos gerentes dessas empresas estão na dificuldade de decidir se as tecnologias estão maduras o suficiente para serem inseridas no produto desenvolvido, mas também no planejamento do futuro das linhas do produto, que pode garantir a disponibilidade de tecnologias apropriadas e a satisfação tanto das expectativas do mercado como das necessidades técnicas dos produtos. Cabe ressaltar que, na indústria de eletrônicos, um produto novo é lançado a cada 12 meses e, por isso, novas tecnologias precisam ser introduzidas continuamente (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015).

Ocorre, entretanto, que uma tecnologia pode levar dois ou três anos para ser desenvolvida. Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) acrescentam em seu estudo que um líder de *design* de produto da Google ponderou, em entrevista, que está buscando modos de validar a maturidade de uma tecnologia para ajudá-lo a guiar os planos de desenvolvimento de um futuro produto.

No Brasil, a Embrapii foi constituída, em 2 de setembro de 2013, com a finalidade de apoiar projetos de P&D, estimulando a cooperação entre governo, instituições de pesquisa científica e tecnológica, públicas ou privadas, e empresas do setor industrial. Concebida inicialmente na forma de empresa e, por isso, ainda mantém as letras “E” e “M” na sigla que traduz sua marca, a Embrapii utiliza o método TRLs para orientar e avaliar projetos de P&D na fase pré-competitiva da inovação tecnológica da indústria (BRASIL, 2013; EMBRAPII, 2015).

O Manual de operação dos polos Embrapii apresenta, em seu Anexo I, a escala TRLs, estabelecendo que os resultados dos projetos por ela contratados devem alcançar níveis de prontidão tecnológica entre TRL 3 e TRL 6. Isso contempla prova de conceito, validação de tecnologias em ambiente laboratorial e em ambiente relevante ou demonstração de tecnologias, modelo, sistema/subsistema em escala de produção (EMBRAPII, 2015).

Em 1º de novembro de 2013, a ISO aprovou a Norma Técnica ISO 16290:2013, que define seus níveis de prontidão de tecnologia. Segundo a ISO, a norma 16290:2013 padroniza os níveis de TRLs para serem aplicados na avaliação da maturidade de uma tecnologia desenvolvida, principalmente, em *hardware* de sistemas espaciais, embora admita que essa ferramenta pode, em muitos casos, atender a um amplo domínio de produtos, processos e serviços (ISO, 2013). Essa norma, elaborada com base nas definições dos TRLs da Nasa, do DOD, da ESA e de outras entidades, descreve

minuciosamente cada um dos níveis de prontidão de tecnologia. Além disso, em cada um deles, fornece exemplos de tecnologias que atingiram aquele patamar, com o fim de oferecer condições propícias a uma avaliação mais precisa.

Em 16 de setembro de 2015, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a Norma ABNT NBR ISO 16290:2015, considerada a versão em português da respectiva norma ISO 16290:2013, elaborada pelo Comitê Brasileiro de Aeronáutica e Espaço (ABNT/CB-08) (ABNT, 2015).

5 O CONCEITO DOS NÍVEIS DE PRONTIDÃO DE TECNOLOGIA

Este capítulo continua a revisão literária sobre os TRLs. Porém, aqui vamos investigar cada um dos níveis para termos uma melhor compreensão sobre o seu conceito. Assim, começaremos com a definição dos TRLs, inserindo-os no contexto do processo de desenvolvimento de tecnologia. Em seguida, descreveremos cada um dos nove níveis de prontidão de tecnologia, dando exemplos ilustrativos para reforçar o entendimento sobre o assunto.

5.1 Conceito dos TRLs

Em seu artigo para desmistificar os níveis de prontidão de tecnologia, Banke (2010) ensina que, no campo da pesquisa e do desenvolvimento, ideias são como crianças em idade escolar. O membro do Conselho Diretor da Missão de Pesquisa em Aeronáutica da Nasa explica que, assim como as crianças, as ideias, quando evoluem para se tornar uma tecnologia, precisam passar por uma série de níveis antes de serem declaradas maduras para a graduação. Na Nasa, bem como no resto das comunidades de pesquisa, cada nível de prontidão de tecnologia revela um degrau na escala de evolução que se inicia a partir de uma ideia oriunda de um pensamento, provavelmente escrito em um guardanapo de papel ou no verso de um envelope, e avança até alcançar o nível de inserção de um produto no mercado (BANKE, 2010).

A Nasa define os TRLs como um método baseado em uma métrica sistemática, que ajuda a identificar elementos e processos de desenvolvimento de uma tecnologia, necessários para alcançar comprovados níveis de prontidão, a fim de assegurar o sucesso de um projeto de P&D. Utilizado como ferramenta da engenharia de sistemas, os TRLs se equivalem a um termômetro que busca medir o grau de amadurecimento de uma tecnologia durante o ciclo de vida de um projeto de P&D (NASA, 2007, 2012a, 2013).

A ESA oferece noção ampla dos TRLs em seu manual, mas muito objetiva, pois coloca, em uma conjuntura atual, a definição clássica dada por Mankins (1995, 2009a) no “Relatório branco” da Nasa. Partindo do conceito de uma disciplina independente – “figura programática de mérito” (*programmatic figure of Merit – FOM*) – para permitir

avaliação e comunicação mais efetiva sobre a prontidão de uma tecnologia, a agência europeia compreende os TRLs como uma ferramenta de gestão para avaliação da maturidade de uma tecnologia particular e comparação consistente da maturidade entre diferentes tipos de tecnologias – “todos no contexto de um sistema, uma aplicação e um ambiente operacional específicos” (ESA, 2008, tradução nossa).

Geralmente, um projeto de P&D tem como objetivo desenvolver e demonstrar uma nova tecnologia, incorporar uma ou mais tecnologias em um sistema, aplicar tecnologia existente para um fim novo ou combinar tecnologia existente e ainda não comprovada com uma em uso para atingir um fim específico. Porém, não basta que ela seja inventada ou conceituada. Para que venha a ter aplicação, a tecnologia precisa ser submetida a processos de experimentação e refinamento, bem como a testes de verificação, validação, desempenho e operação, entre outros, até que esteja realmente pronta para ser transformada em um produto ou processo capaz de ser industrializado ou comercializado. Dependendo do tipo de tecnologia, esse processo de amadurecimento pode levar anos ou até mesmo décadas. Somente depois de suficientemente comprovada, ela poderá ser absorvida pelo mercado como um ativo de capital.

O desenvolvimento de tecnologias e sistemas enfrenta, inevitavelmente, os três grandes desafios de qualquer projeto de P&D: desempenho, cronograma de tempo e orçamento. Quando as atividades de pesquisa são bem executadas, ajudam a reduzir substancialmente incertezas em todas as três dimensões de gestão do projeto. Em contrapartida, quando as atividades de pesquisa ocorrem de forma precária ou deixam de ser realizadas no todo, o desenvolvimento de novos sistemas pode sofrer com excesso de custos, perda de prazos previstos no cronograma de tempo, falhas técnicas e a erosão constante dos objetivos iniciais do projeto (MANKINS, 2009a).

Assim, antes de se estabelecer os objetivos de um projeto de P&D, deve-se determinar em que nível de prontidão se encontra a tecnologia que se pretende desenvolver. Esse passo é necessário porque o TRL determina não só o nível de prontidão de uma dada tecnologia em seu estado da arte, mas estabelece também o nível de prontidão que essa tecnologia precisa alcançar para ser operada no ambiente para o qual foi originariamente planejada, com as características de desempenho que satisfaçam os requisitos do sistema e da missão (NASA, 2012a).

Se considerarmos um sistema específico, o processo de amadurecimento da tecnologia deve evoluir a um nível capaz de permitir aos engenheiros estabelecer uma

base tecnicamente acreditável sobre o alcance, o cronograma de tempo e o custo do projeto. Os gerentes de desenvolvimento e os de sistemas precisam fazer avaliações claras e bem documentadas da maturidade e dos riscos da tecnologia, além de estarem aptos a fazê-las em pontos-chave de tomada de decisão durante o ciclo de vida de um projeto de P&D (NASA, 2007, 2013, 2012a).

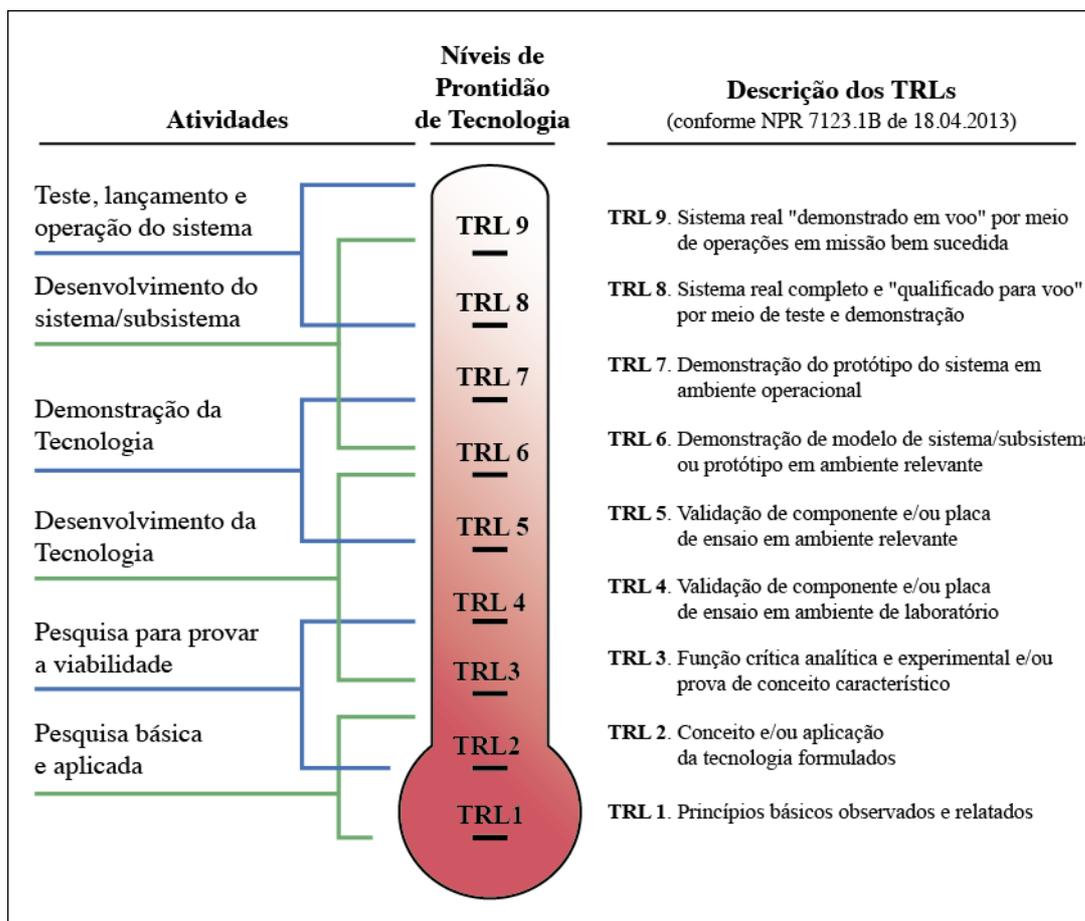
Logo, para evitar que um projeto de P&D corra o risco de ir adiante com uma pesquisa de base mal definida, os TRLs apresentam-se como métrica sistemática que ajuda a avaliar a maturidade da tecnologia durante seu processo de desenvolvimento, possibilitando correta quantificação de seu impacto. Em adição, como ferramenta de medida, os TRLs permitem também uma comparação consistente dos níveis de prontidão entre diferentes tipos de tecnologias (MANKINS, 1995).

A avaliação da prontidão de tecnologia é, então, feita por meio de uma escala, que começa no TRL 1, por definição o nível mais baixo, e avança nível a nível até alcançar o TRL 9, atualmente o último, localizado no topo da gradação da métrica. A progressão dos níveis de prontidão de tecnologia, por meio da escala TRLs, tem início com a pesquisa científica sendo convertida em pesquisa aplicada, relacionada à tecnologia que se pretende desenvolver. Logo, TRL 1 assinala que o conhecimento adquirido em uma pesquisa científica básica, do tipo acadêmica, começa sua jornada evolutiva com o primeiro passo dado a partir de uma ideia que progride para a aplicação de uma lição aprendida, com o objetivo de atingir um fim específico (BANKE, 2010).

Ao avançar na escala, a tecnologia evolui para os níveis seguintes: formulação de um conceito inicial para aplicação, prova de conceito, verificação funcional em ambiente laboratorial e em ambiente relevante, demonstração de funções críticas de um elemento em ambiente relevante, testes de desempenho em ambiente operacional, qualificação do sistema real para voo, verificação do sistema por meio de operações em missões bem-sucedidas. No TRL 9, a tecnologia foi totalmente incorporada a um sistema maior, demonstrado para funcionar com capacidade plena (GRAETTINGER et al., 2002; BANKE, 2010).

Segue o Quadro 3 que resume os TRLs e as atividades de P&D relacionadas.

Quadro 3 - Níveis de Prontidão de Tecnologia – TRLs criados pela Nasa



Fonte: Quadro adaptado. Tradução livre para o português (Brasil), da ilustração do diagrama de termômetro com a escala TRL (NASA, 2007, Apêndice G, p. 296; NASA, 2013). Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080008301.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

Vale notar que, na coluna do meio do Quadro 3, encontra-se o diagrama de termômetro, uma metáfora para o aumento da prontidão de tecnologia: à medida que a escala de temperatura sobe, os níveis avançam do TRL 1 ao TRL 9 e, inversamente, o grau de incerteza diminui. TRL 1 e TRL 2 estão na base do termômetro, marcada em tom vermelho forte, pois, nesses níveis, as incertezas sobre a tecnologia são grandes. Conforme os níveis de prontidão de tecnologia avançam, as incertezas diminuem, assim como a tonalidade do vermelho no termômetro.

Na coluna da direita estão as descrições de cada um dos TRLs, de acordo com a NPR 7123.1B, de 18 de abril de 2013 (NASA, 2013); a coluna da esquerda apresenta as atividades a serem realizadas ao longo do processo de desenvolvimento de tecnologia (NASA, 2007). Esse processo não é estanque, compartimentado em estágios distintos ou divididos em partes isoladas. Ao contrário, as atividades exercidas ao longo do ciclo

de vida do desenvolvimento da tecnologia se entrelaçam à medida que ocorre seu amadurecimento.

Como se pode observar no Quadro 2, o processo tem início com as atividades de pesquisa básica relacionada à tecnologia a ser avaliada, que vai desde TRL 1, ou seja, quando os princípios básicos são observados e relatados por meio de pesquisa científica do tipo acadêmica, até o TRL 3, quando ocorre a função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característico. À proporção que as atividades de pesquisa básica avançam, começam, ao mesmo tempo, as atividades de pesquisa para provar a viabilidade da tecnologia em TRL 2, momento no qual conceitos e/ou aplicação da tecnologia podem ser formulados, e vão até TRL 4, com a validação de componente, placa de ensaio ou maquete em ambiente laboratorial.

Porém, as atividades de desenvolvimento de tecnologia não ficam paradas aguardando o término da prova de viabilidade. Ao contrário, iniciam-se logo após o término das atividades de pesquisa básica em TRL 2, com a prova de conceito analítica e experimental, e avançam até a tecnologia alcançar o nível de prontidão TRL 6, no qual um modelo ou protótipo representativo do sistema/subsistema é demonstrado em ambiente relevante. Enquanto as atividades de desenvolvimento ainda estão em curso, as atividades de demonstração da tecnologia começam em TRL 5 e evoluem até atingir TRL 7, com a demonstração do protótipo do sistema em ambiente operacional.

Logo após o término das atividades de desenvolvimento, e durante as de demonstração da tecnologia começam as atividades de desenvolvimento do sistema/subsistema em TRL 6, que perduram até a avaliação final do amadurecimento da tecnologia em TRL 9. Por fim, as atividades de testes, lançamento e operações são introduzidas em TRL 8, quando o sistema real é “qualificado para voo”, e progride até o amadurecimento completo da tecnologia, o que ocorre na Nasa em TRL 9, momento em que o sistema real é demonstrado em voo por meio de operações em missão bem-sucedida.

Cumprir observar que a escala TRLs é usada para registrar o processo de amadurecimento que começa com ciência, passa por engenharia e termina com tecnologia. Os três primeiros níveis da escala (TRL 1 a TRL 3) são, geralmente, relacionados a um fenômeno científico, enquanto os três últimos tratam, quase que exclusivamente, da especificidade da tecnologia, ou seja, de sua sistematização e

operacionalização. No entanto, os níveis intermediários – TRL 4 a TRL 6 – traçam a fronteira “*fuzzy*”.

Podemos, portanto, concluir que, nos níveis intermediários, se concentram as pesquisas avançadas abrangendo tanto pesquisas científicas como aplicadas, voltadas para o desenvolvimento da tecnologia. É, portanto, nessa fronteira “*fuzzy*”, que o engenheiro deve estar preparado para lidar com as “incertezas imprevisíveis” definidas por De Meyer, Loch e Pitch (2002, p. 65-66) ou, ainda, para se aventurar no campo do conhecimento em que a comunidade “não sabe que não sabe”, mencionado por Watanabe (2008, 2012), e que vai além de sua base experimental (BILBRO, 2007b).

Em suma, os TRLs descrevem o estado da arte de determinada tecnologia e estabelecem uma escala padrão, na qual a prontidão é avaliada e o avanço, definido. Como métrica, os TRLs oferecem a estrutura necessária para que a maturidade de uma tecnologia ou de um sistema venha a ser avaliada em termos operacionais e mensuráveis. Essa ferramenta proporciona a gerentes de projeto, engenheiros e pesquisadores uma forma eficaz de apresentar a desenvolvedores de projetos (*designers*), fabricantes, investidores e credores, bem como ao consumidor em geral, uma avaliação dos níveis de desempenho e alinhamento da tecnologia a seus objetivos, garantindo, por conseguinte, o êxito do projeto (NASA, 2007, 2012a, 2013).

5.2 Descrição e exemplos dos nove níveis TRLs

Como ficou demonstrado no capítulo 4, a escala TRLs vem sendo usada por agências, departamentos governamentais, universidades, institutos e empresas de tecnologia que desenvolvem projetos de P&D. De fato, essa escala de graduação baseada no método desenvolvido pela Nasa é o principal instrumento de avaliação da maturidade de tecnologia. No entanto, sua implementação no processo de tomada de decisão, durante o curso do desenvolvimento de tecnologia, requer a definição dos termos utilizados na aplicação dos níveis de TRLs. A escala precisa ser adaptada para atender a finalidades específicas de cada projeto de P&D, bem como garantir um processo de tomada de decisão apropriado à realidade atual de cada organização no contexto de suas necessidades.

Para os fins deste trabalho, adotamos o método dos níveis de prontidão de tecnologia desenvolvido pela Nasa, comparando-o com os métodos utilizados pela ESA

e com algumas pequenas pontuações sobre o método do DOD. Essas entidades elaboraram métodos e planos com base nas experiências adquiridas com a execução de seus projetos de P&D nas mais diversas áreas da engenharia, o que gerou grande interesse para este trabalho, especialmente para a análise do estudo do projeto MagLev-Cobra.

Considerando que, durante a elaboração deste trabalho, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou, em 16 de setembro de 2015, a Norma ABNT NBR ISO 16290, com validade a partir de 16 de outubro de 2015, decidimos analisar também as descrições por ela padronizadas para os TRLs, que seguem em conformidade com a Norma Internacional ISO 16290:2013. Como já mencionado no capítulo 3, e a própria norma de padronização explica, a definição dos TRLs é aplicável, principalmente, aos sistemas espaciais, mas pode ser adaptada para atender a outras disciplinas, de acordo com suas especificidades.

Cada um dos níveis de TRL abaixo está destacado em negrito e descrito de acordo com a literatura acadêmica, no que se refere a normas, requisitos e procedimentos implementados pela Nasa e demais organizações.

Para melhor visualização e acompanhamento das descrições dos TRLs a seguir, ressaltando as características assinaladas com relação a sua aplicação pelas organizações acima citadas, recomendamos a consulta ao Apêndice B, que contém o quadro da escala TRLs em vigor na Nasa, conforme a NPR 7123.1B (NASA, 2013).

- TRL 1: Princípios básicos observados e relatados

Esse é o nível mais baixo da escala TRLs. Nesse primeiro nível, iniciam-se as pesquisas científicas, e os resultados produzidos começam a ser traduzidos em futuras pesquisas aplicadas, visando a produção acadêmica, a publicação de artigos sobre estudos das propriedades básicas de uma tecnologia ou trabalhos experimentais, que consistem principalmente na observação do mundo físico. As pesquisas podem usar informações de apoio, que incluem artigos científicos publicados ou outras referências que ajudem a identificar os princípios nos quais se baseia a tecnologia (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Como critério de saída do TRL 1, a Nasa especifica em seu quadro, de forma sucinta, apenas a publicação de artigo revisado por pares, cientistas e/ou especialistas da

área da disciplina estudada, apontando os conceitos e/ou aplicações propostos (NASA, 2013).

A ESA é mais abrangente em seu critério de avaliação para evidenciar a conclusão do TRL 1 (ESA, 2008). Seu manual exige mais do que um artigo científico publicado em revista indexada. A agência espacial europeia ressalta que uma avaliação da prontidão de determinada tecnologia no nível TRL 1 deve contar com a participação, direta ou indireta, de pesquisadores envolvidos no avanço da disciplina científica, bem como tecnólogos e/ou inventores interessados em criar novos conceitos a partir de novas descobertas e/ou novos conhecimentos. No TRL 1, revisores independentes também podem ser convidados para participar em processo de avaliação de tecnologia e em processos competitivos para aquisição de novas tecnologias. Como exemplo desse tipo de avaliação independente, o manual da ESA sugere a avaliação das propostas por uma agência do governo que patrocina a pesquisa científica (ESA, 2008).

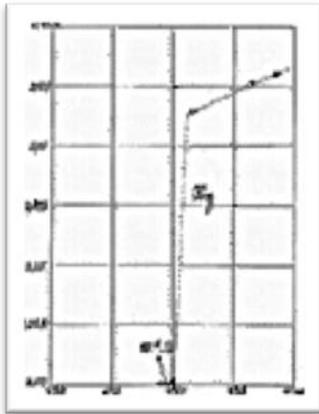
De fato, as pesquisas básicas efetuadas nesse primeiro nível são, geralmente, avaliadas e financiadas por instituições ou agências de fomento à pesquisa, universidades, institutos tecnológicos e demais instituições de apoio à pesquisa e inovação. No Brasil, essas atividades são promovidas por meio de bolsas de estudo e de incentivo à pesquisa por entidades como CNPq, Capes, fundações de amparo à pesquisa, entre outras. Assim, uma primeira avaliação da maturidade da tecnologia e de sua possível aplicação é efetuada por comissões formadas por membros da comunidade científica e tecnológica e consultores *ad hoc* das referidas agências e/ou entidades científicas e tecnológicas. No caso do CNPq, por exemplo, os projetos são avaliados pelos comitês de assessoramento, constituídos para cada área científica e tecnológica ou, em casos especiais, pelo conselho deliberativo da própria agência (CNPq, 2010).

Em adição, o manual da ESA também enumera, entre as evidências que considera apropriadas para a avaliação no TRL 1, a apresentação dos resultados obtidos com análise ou modelagem do experimento para demonstrar princípios fundamentais e descrever novas capacidades (ESA, 2008). Porém, a norma ABNT NBR ISO 16290:2015 observa que, geralmente, nesse primeiro nível da escala TRLs, a avaliação não deve exigir a definição dos requisitos de desempenho da tecnologia, pois isso só deve ocorrer no TRL 2, com a prova de conceito (ABNT, 2015).

Logo, os projetos de pesquisa básica no TRL 1 não são formulados para executar uma missão específica ou desenvolver determinados produtos ou processos, mas apenas

para observar e testar as propriedades básicas de certos materiais. Assim, embora seja desnecessário definir os requisitos de desempenho da tecnologia, consideramos relevante que, nesse ponto inicial, a avaliação preliminar seja pelo menos capaz de determinar se o fenômeno científico observado é passível de futuras pesquisas de P&D.

Como exemplo de tecnologia avaliada no TRL 1, a ABNT NBR ISO 16290:2015 cita a descoberta do fenômeno da supercondutividade por Heike Kamerlingh Onnes, em 1911. Onnes demonstrou, com sua pesquisa, o desaparecimento abrupto da resistência elétrica para certos materiais abaixo de uma temperatura característica (ABNT, 2015).

	
<p>Figura 6 - Retrato do físico Heike Kamerlingh Onnes. Data/local: Prêmio Nobel de 1913, Suécia. Fotógrafo desconhecido.</p>	<p>Figura 7 - Primeiras medições de supercondutividade, de acordo com a resistência de um capilar de mercúrio como uma função da temperatura.</p>
<p>Fonte: Fundação Nobel. Disponível em: <http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes.html>. Arquivo de domínio público, publicado há mais de 70 anos, enviado em 5 set.2010. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=879737>. Acesso em: 17 abr.2016.</p>	<p>Fonte: Digitalizado de <i>Boston Studies in the Philosophy of Science</i>, v. 124, p. 269. Arquivo de domínio público, enviado em 22 ago. 2015. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=42559360>. Acesso em: 17 abr 2016.</p>

Esse exemplo é de muita valia para nosso trabalho, pois foi a partir da descoberta do fenômeno da supercondutividade por Heike Kamerlingh Onnes, em 1911, que o Projeto Mag-Lev Cobra constituiu sua base para o desenvolvimento da tecnologia SML. Onnes resfriou uma amostra de mercúrio utilizando hélio liquefeito. Quando o material foi resfriado à temperatura 4,2 K, a resistência caiu. Esse limiar é chamado de temperatura crítica e nela se estabelece o fenômeno da supercondutividade (MOON, 1994; FABRÍCIO e TUMA, 2015).

Mankins (1995, 2009b) observa que os custos para uma tecnologia alcançar o primeiro nível de prontidão variam de acordo com a área de disciplina da pesquisa e, portanto, tendem a ser específicos para cada tecnologia. A título ilustrativo, o autor do “Relatório branco” dos TRLs compara os custos relacionados a uma descoberta nas áreas de aerodinâmica ou bioquímica com os de uma área de sistemas de computação. Nesses casos, as tecnologias a serem desenvolvidas nas áreas de aerodinâmica ou de bioquímica, ainda que no nível mais baixo da escala TRLs, exigem grande infraestrutura, com equipamentos e instalações, como túneis de vento e laboratórios de alta precisão.

Já os custos para que uma descoberta de novos algoritmos computacionais venha a alcançar o nível TRL 1 serão bem menores, pois o projeto pode demandar apenas um laboratório com alguns pesquisadores e equipamentos de informática (MANKINS, 1995, 2002, 2009b). Por essa razão, os investimentos são geralmente canalizados para programas de pesquisa científica e tecnológica em universidades e institutos de tecnologia.

- TRL 2: Conceito e/ou aplicação de tecnologia formulados

No nível 2, inicia-se a pesquisa para provar a viabilidade técnica da tecnologia. Uma vez observados e relatados os princípios básicos, os engenheiros passam a formular aplicações práticas dos resultados iniciais. O objetivo é identificar as características da tecnologia que podem vir a ser desenvolvidas. Esse nível compreende, portanto, a formulação de um conceito baseado em um princípio matemático ou físico, novo ou existente. No TRL 2, as aplicações de sistemas são ainda especulativas, e não há nenhuma prova experimental específica ou análise detalhada para sustentar os pressupostos. Os exemplos estão limitados a estudos analíticos (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

No TRL 2, a Nasa determina, como critério de saída, a descrição documentada da aplicação e/ou do conceito que aborda a viabilidade e o benefício da tecnologia a ser desenvolvida (NASA, 2013). Em contrapartida, o “Manual ESA” é mais específico, pois exige que a nova tecnologia ou o conceito que está sendo formulado seja descrito de forma suficientemente clara, e com detalhes consistentes, para que qualquer pessoa habilitada no campo pesquisado possa entender e avaliar seu potencial de uso. Assim, a avaliação da prontidão da tecnologia no TRL 2 deve apresentar, entre outros,

documentos que contenham análises quantitativas, identificação do ambiente operacional prospectivo, dos requisitos de desempenho, das tecnologias constituintes, dos resultados obtidos e do ambiente em que os estudos científicos foram realizados para verificar os fenômenos relevantes (ESA, 2008).

Para avaliar a prontidão da tecnologia no TRL 2, a ABNT NBR ISO 16290:2015 apresenta diretrizes genéricas, determinando apenas que os requisitos de desempenho dos elementos técnicos sejam gerais e definidos de forma abrangente. A título ilustrativo, a norma brasileira de padronização descreve como passo seguinte à observação do fenômeno da supercondutividade no TRL 1, sua aplicação na construção de detectores bolométricos altamente sensíveis, mediante uso de material supercondutor, como alumínio ou titânio, em torno de sua temperatura de transição de supercondutividade (ABNT, 2015).

Quando a energia é absorvida pelo detector, a temperatura do material supercondutor aumenta, levando-o ao estado de não supercondutividade, o que acarreta o aumento de sua resistência elétrica. Assim, esse aumento na resistência pode ser usado para aferir pequenas alterações na temperatura e, portanto, na energia. Nesse caso, o amadurecimento do fenômeno da supercondutividade no TRL 2 pode ser demonstrado mediante descrição minuciosa do artefato e de como ele é usado para detectar pequenas alterações de energia. Logo, os resultados de estudos obtidos com análises quantitativas das alterações de temperatura corroboraram a avaliação do amadurecimento dessa tecnologia no TRL 2.

O fenômeno da supercondutividade é um exemplo clássico de como esse processo de amadurecimento pode levar décadas até que a tecnologia seja considerada suficientemente comprovada. Após a descoberta de Onnes em 1911, que marcou o início da história da supercondutividade, algumas descobertas interessantes marcaram a longa trajetória dessa tecnologia.

Em 1933, Walter Meissner e Robert Ochsenfeld descobriram que campos magnéticos são expulsos de supercondutores. O “efeito Meissner” prevê que supercondutores podem levitar sobre ímãs. Em 1957, John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer publicaram sua “teoria BCS” para explicar o fenômeno a partir dos “pares de Cooper”. Essa teoria previa que a supercondutividade não poderia ocorrer em materiais com temperaturas muito acima de 20 K. No entanto, em 1986, Georg Bednorz e Alexander Müller descobriram supercondutividade em 35 K, quebrando a barreira de

20K da teoria BCS. O material por eles utilizado não era um metal, mas sim um supercondutor cerâmico. No ano seguinte, ou seja, em 1987, Paul Chu e sua equipe quebraram o limite de 77 K da barreira de nitrogênio líquido. Eles descobriram supercondutividade à temperatura de 93 K em um composto de óxido de ítrio-bário-cobre (YBCO). Essa descoberta revolucionou as possibilidades de aplicação dessa tecnologia, permitindo a construção de novos materiais supercondutores em elevada temperatura crítica (MOON, 1994; FABRÍCIO e TUMA, 2015)

Embora tenha sido descoberto por Onnes em 1911, aplicações práticas da supercondutividade somente foram definidas para a utilização em dispositivos de película fina e sensores de telescópios no fim da década de 80, em vista da descoberta dos supercondutores de elevada temperatura crítica (*high-temperature superconductor* – HTS).



Figura 8 - Foto do telescópio espacial Hubble (HST) iniciando sua separação do ônibus espacial Discovery, seguindo seu lançamento na missão STS-82.

Fonte: Foto adaptada. Nasa, em 19 fev. 1997. Disponível em:
<<http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-82/html/s82e5937.html>>;
<<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap021124.html>>;
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hubble_01.jpg?uselang=pt-br>. Acesso em: 26 abr.2016.

Mankins (1995) assinala que os custos para alcançar o TRL 2 são considerados relativamente baixos porque representam uma pequena fração dos custos de eventual aplicação do sistema envolvendo os princípios básicos observados. Igualmente como

ocorre no TRL 1, esses custos costumam ser específicos para a tecnologia, pois podem variar de uma disciplina de pesquisa ou de uma invenção para outra. Geralmente, os investimentos nesse nível nascem em consequência dos estudos de conceitos avançados elaborados no TRL 1, e são direcionados a programas de pesquisa básica.

As atividades que envolvem o amadurecimento da tecnologia no TRL 2 podem ser realizadas por qualquer tipo de organização, mas são usualmente desenvolvidas por universidades, institutos de tecnologia, pequenas e médias empresas e empreendedores ou pesquisadores individuais (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

- TRL 3: Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característico

No TRL 3, as atividades de P&D começam a ocorrer de forma mais efetiva. Nesse terceiro nível do processo de maturação da tecnologia, a prova da função ou da característica do elemento abrange tanto estudos analíticos, para fixar a tecnologia em um contexto apropriado, como experimentos ou testes em laboratório com base apropriada para validar fisicamente se as previsões analíticas estão corretas. Logo, os estudos analíticos e experimentais em laboratório constituem a validação da prova de conceito e/ou das aplicações formuladas no TRL 2 (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Mankins (2009b) argumenta que a escolha da abordagem analítica ou experimental depende, em parte, dos fenômenos físicos envolvidos na invenção. O relator dos TRLs pondera que conceitos relativamente simples de sistemas físicos ou químicos podem ser comprovados até mesmo com quadro branco (ou papel) e caneta. Do mesmo modo, novos algoritmos e novas técnicas computacionais também podem ser comprovados analiticamente. No entanto, outras invenções podem demandar validação física experimental, tais como as que envolvem conceitos altamente complicados ou mesmo aquelas que envolvem fenômenos dependentes do ambiente ou efeitos de novos materiais.

A ABNT NBR ISO 16290:2015 esclarece que a prova de conceito analítica inclui modelamento e testes de simulação; a experimental envolve não só os experimentos laboratoriais, como também testes de medidas para dar suporte às previsões analíticas e aos modelos. Para a Norma Brasileira de Padronização, no TRL 3, assim como no TRL 2, os requisitos de desempenho ainda são gerais e definidos de forma abrangente. Porém, eles devem ser consistentes com o conceito e/ou a aplicação

da tecnologia formulados. Assim, a ABNT NBR ISO 16290:2015 afirma que, no TRL 3, tanto os objetivos como os requisitos de desempenho funcional do elemento estão definidos com relação ao estado da arte em que se encontra a tecnologia naquele nível do processo de amadurecimento (ABNT, 2015).

Nesse contexto, a Nasa aponta, em sua tabela, a elaboração de resultados analíticos e/ou experimentais documentados que estejam validando as previsões dos parâmetros-chave como critério de saída do TRL 3 (NASA, 2013). No mesmo sentido, a ESA também destaca, entre as evidências que considera apropriadas para a avaliação da prontidão da tecnologia no TRL 3, a apresentação de documentação que descreva detalhadamente os resultados de todos os estudos analíticos e/ou experimentais realizados, com o fim de demonstrar que a tecnologia pode atingir as funções críticas sobre as quais as aplicações futuras do sistema dependam (ESA, 2008).

Como exemplo, Mankins (2009) cita o conceito para propulsão de matéria de alta densidade de energia (*high energy density matter* – HEDM). Um propulsor para foguete pode usar hidrogênio semiderretido ou super-refrigerado. Logo, o TRL 3 só deve ser alcançado quando a correta combinação de temperatura e pressão para o fluido for obtida em laboratório.

Entre os exemplos de TRL 3 fornecidos pela ABNT NBR ISO 16290:2015, cabe mencionar o do giroscópio a *laser* de fibra ótica, usado para a propagação da luz e do efeito Sagnac. Nesse terceiro nível de prontidão da tecnologia, os estudos analíticos demonstram que o conceito geral está modelado, incluindo a fonte de *laser*, a bobina de fibra ótica e a medição da diferença de fase, enquanto os estudos experimentais sustentam testes com a injeção de *laser* na fibra ótica e os princípios de detecção de propagação da luz (ABNT, 2015).

Com relação aos custos para alcançar o TRL 3, Mankins (2009) observa que são considerados relativamente baixos, pois representam uma pequena fração dos custos de eventual aplicação do sistema, que envolve a validação dos elementos críticos ou funções a serem obtidas nos níveis seguintes. Assim como ocorre em TRL 1 e TRL 2, os custos em TRL 3 também tendem a ser específicos para a tecnologia que está sendo desenvolvida e, como mencionado acima, podem variar significativamente de uma área de P&D para outra. As atividades de pesquisa e desenvolvimento em TRL 3 são realizadas por qualquer tipo de organização, pública ou privada, e costumam envolver investimentos do governo e/ou da indústria.

- TRL 4: Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente de laboratório

Uma vez definida a prova de conceito para as funções críticas ou características, a tecnologia pode avançar. Durante o TRL 4, os elementos básicos que compõem uma tecnologia devem ser integrados para estabelecer que as “peças” funcionem juntas. O objetivo é alcançar níveis de desempenho que permitam aplicar o conceito em um componente e/ou placa de ensaio. A validação da tecnologia no TRL 4 deve ser projetada para fundamentar o conceito formulado anteriormente no TRL 3, e também deve ser compatível com os requisitos para potenciais aplicações do sistema no TRL 5. Nesse nível 4, a validação da tecnologia é de baixa fidelidade em comparação com o eventual sistema, e pode ser composta de elementos individuais ou subsistemas construídos no ambiente do laboratório (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Cumpre, por um lado, destacar que a Nasa usa o termo “*breadboard*” que, no nosso entender, pode ser traduzido como uma placa de ensaio ou protótipo a ser construído em laboratório. Por outro lado, a ABNT NBR ISO 16290:2015, utiliza a expressão “maquete do sistema”.

Já o DOD emprega o termo “*brassboard*” quando associa a prontidão da tecnologia à prontidão de fabricação. Com efeito, ao mencionar o termo refere-se a um modelo de demonstração ou de teste experimental de componentes, subsistemas ou sistemas que tenham associados processos de fabricação, materiais e métodos. Trata-se, portanto, de uma unidade funcional que contém a configuração física em escala aproximada do sistema operacional final (DOD, 2005).

O Apêndice C traz a definição dos termos técnicos utilizados nesta dissertação, conforme o método TRLs criado pela Nasa.

A norma brasileira de padronização informa ainda que, assim como no TRL 3, no TRL 4 os requisitos de desempenho do elemento também são gerais e definidos de forma abrangente (ABNT, 2015). Porém, nesse nível, eles devem ser consistentes com quaisquer potenciais aplicações em sistemas. Logo, os requisitos preliminares do desempenho funcional e os objetivos do elemento são definidos com relação ao estado da arte em que se encontra a tecnologia nesse quarto nível do processo de amadurecimento.

Sobre a descrição de *hardware*, a Nasa considera que, no TRL 4, é necessário construir uma placa de ensaio ou protótipo de baixa fidelidade do componente e/ou sistema, operá-la, com o fim de demonstrar a funcionalidade básica da tecnologia em testes críticos realizados no ambiente laboratorial, e definir as previsões de seu desempenho com relação ao ambiente operacional final. Como critério de saída, a Nasa propõe que testes de desempenho sejam documentados, demonstrando que os resultados obtidos estão consistentes com as previsões analíticas. A agência espacial considera também importante a definição muito bem detalhada e documentada do ambiente relevante (NASA, 2013).

A ESA relaciona em seu manual, entre as evidências que acredita apropriadas para a avaliação da prontidão da tecnologia no TRL 4, a descrição da aplicação pretendida no ambiente operacional dos requisitos de desempenho, das tecnologias constituintes adicionais e das interações entre esses fatores. Também ressalta a necessidade de identificação de todos os estudos analíticos e/ou experimentais que tenham sido realizados, assim como dos resultados obtidos, demonstrando a viabilidade da tecnologia (ESA, 2008).

A ABNT NBR ISO 16290:2015 cita, como um dos exemplos de TRL 4, a construção de uma maquete do giroscópio a *laser* de fibra ótica. Para evidenciar a prontidão da tecnologia no quarto nível, nesse experimento, a maquete deve conter o diodo de *laser* proposto, a fibra ótica e o sistema de detecção. Os estudos experimentais devem demonstrar, em laboratório, o desempenho na medida da velocidade angular para a rotação de um eixo (ABNT, 2015).

No tocante aos custos para levar a tecnologia ao nível de prontidão em TRL 4, Mankins (1995) argumenta que deverão ser baixos ou moderados, se comparados com os custos de uma eventual aplicação do sistema envolvendo os conceitos e componentes que estão sendo testados. Assim como ocorre nos níveis anteriores, os custos em TRL 4 tendem a ser, em grande parte, de tecnologia única. No entanto, ressalta ser provável que, embora o investimento exigido no TRL 4 seja específico para a tecnologia, certamente será maior do que foi o necessário para a mesma tecnologia atingir TRL 3 (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

- TRL 5: Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente relevante

TRL 5 é considerado um prolongamento do TRL 4. Porém, com um acréscimo: no quinto nível de amadurecimento, a função crítica do componente, placa de ensaio ou maquete deve passar por testes mais rigorosos do que os sofridos no quarto. Em outras palavras, a fidelidade do componente e/ou subsistema a ser testado deve aumentar significativamente. Os elementos tecnológicos básicos precisam ser integrados com os elementos de apoio de modo razoavelmente realista para que as aplicações (em nível de sistema, subsistema ou de componente) possam ser testadas em um ambiente relevante. Testes de simulação devem ocorrer em ambientes que sejam o mais próximo possível do real (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

De certo, no TRL 5, as noções sobre os objetivos da missão e o ambiente relevante são ainda preliminares. Porém, elas necessitam estar bem identificadas de modo a permitir um delineamento básico do ambiente relevante associado, bem como dos requisitos de desempenho e da concepção inicial do elemento, subsistema ou sistema.

A norma ABNT NBR ISO 16290:2015 instrui que, no TRL 5, a identificação da função crítica do elemento ocorre após a definição preliminar dos requisitos de desempenho e do ambiente relevante, além do delineamento de um plano de verificação. Em seguida, os testes de simulação com a placa de ensaio e/ou maquete são executados com sucesso para assegurar o desempenho do elemento e eliminar incertezas ainda existentes. A maquete pode ser adaptada às necessidades de verificação da função crítica, entretanto, deve ser uma representação do elemento na medida do necessário para eliminar, de forma inequívoca, incertezas e, ao mesmo tempo, demonstrar seu desempenho (ABNT, 2015).

Algumas incertezas nas funções críticas podem estar relacionadas aos próprios requisitos de desempenho. Segundo a ABNT NBR ISO 16290:2015, o desempenho ou parâmetro de concepção pode ser desconhecido ou impreciso quanto à sua especificação, embora esteja claramente associado a uma função crítica e aos requisitos de desempenho de uma missão bem definida. Nesse caso, a Norma Brasileira de Padronização pondera que a demonstração da maquete deve mitigar as incertezas

relacionadas aos parâmetros de concepção e fornecer potencial retorno de informações sobre a especificidade do elemento (ABNT, 2015).

Nesse contexto, a Nasa aponta, em sua tabela, a documentação de testes de desempenho, demonstrando consistência com as previsões analíticas, e a definição documentada de requisitos de escala como critério de saída do TRL 5 (NASA, 2013).

Já o manual da ESA considera apropriada, para a avaliação da prontidão da tecnologia no TRL 5, entre outras evidências, a apresentação de documentos que tanto demonstrem aplicações de funcionalidade focadas no cliente – e resultem em métricas de desempenho do elemento, incluindo a definição de conceitos apropriados de operações e ambientes operacionais para as aplicações potenciais – como contenham descrições detalhadas de todos os testes e estudos analíticos realizados para demonstrar a exequibilidade da tecnologia, além do delineamento de toda e qualquer referência que documente os resultados de análise, modelagem e demonstrações de desempenho (ESA, 2008).

Quando o quinto nível de prontidão da tecnologia é alcançado, a validação do elemento (subsistema e/ou sistema) é considerada como efetivamente demonstrada, embora sujeita a efeitos de escala, uma vez que o desempenho das funções críticas é verificado por meio de testes de simulação realizados com maquete em ambiente relevante. Isso ocorre porque, com os testes feitos no TRL 5, os requisitos de desempenho do elemento são frequentemente consolidados, mas seu desenvolvimento não está totalmente concluído, em razão das incertezas resultantes dos efeitos de escala. Necessário, então, atentar para possíveis riscos remanescentes, relacionados a provável falha na identificação das funções críticas, falta de integralidade no plano de verificação associado e/ou subestimativa dos efeitos de acoplamento entre as partes do elemento, que podem tornar o modelo inadequado para eliminar as incertezas acaso existentes (ESA, 2008; ABNT, 2015).

Um exemplo muito citado é o de um veículo lançador de foguete ou satélite em que, nesse nível, a disponibilidade da tecnologia é demonstrada em escala reduzida. Isso ocorre porque o gerenciamento do combustível é uma função crítica do sistema do veículo lançador. Com isso, no TRL 5, a demonstração do gerenciamento do propelente é alcançada no solo e em escala reduzida, tendo em vista que uma demonstração em escala real dificilmente poderia ser obtida nesse nível.

Mankins (1995) considera que, no TRL 5, os custos com P&D podem vir a ser de moderado a alto e tendem a ser específicos para uma tecnologia. Esses custos seriam provavelmente muito semelhantes aos do TRL 4. Porém, em escala de grandeza, os custos no TRL 5 são estimados em duas a três vezes maiores do que o necessário gasto para alcançar o nível anterior na mesma área de pesquisa. Essas atividades são normalmente realizadas por uma organização formal de P&D (como um laboratório empresarial ou universitário), mas, devido aos custos crescentes, envolvem algum patrocínio oficial, como financiamentos por meio de agências governamentais ou de investimentos oriundos de indústria, bancos privados ou grupos de financiamento de risco (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

- TRL 6: Demonstração de modelo do sistema/subsistema ou protótipo em ambiente relevante

O TRL6 representa um passo importante na demonstração da prontidão da tecnologia a ser dado após a conclusão dos testes no TRL 5. No nível seis, a tecnologia deve ser demonstrada em um modelo representativo em escala de engenharia ou em um protótipo inteiramente funcional, testado em ambiente relevante. O teste com modelo ou protótipo funcional deve ir muito além do que o feito no nível de fidelidade da demonstração da tecnologia obtido no TRL 5, com a validação das funções críticas do elemento em ambiente relevante (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Neste nível, relevante é o ambiente de teste do modelo ou do protótipo funcional que simula os aspectos-chave do ambiente operacional. Segundo a Nasa, isso significa que se o único ambiente relevante for o espaço, então, o modelo ou protótipo funcional deve ser testado no espaço a fim de que a tecnologia seja demonstrada. Para se ter ideia da importância desse nível no processo de maturação da tecnologia, o TRL 6 apresenta-se como último estágio no qual a fidelidade da tecnologia é testada com engenharia de escala-piloto em um ambiente muito próximo do real (NASA, 2007, 2013).

Por essa razão, a diferença entre o TRL 5 e o TRL 6 reside no passo adiante no processo de maturação da tecnologia, pois os testes para sua validação vão da escala de laboratório para a escala de engenharia. É justamente a determinação dos fatores de escala que possibilitará o *design* do sistema operacional. Logo, o protótipo funcional deve ser capaz de desempenhar todas as funções críticas que serão exigidas do sistema operacional.

A Nasa determina que, no caso de *hardware*, seja construído um protótipo do sistema/subsistema/componente de alta fidelidade, capaz de tratar de forma adequada todos os problemas críticos de escala, e ser operado sob condições ambientais relevantes. Como critério de saída do TRL 6, o órgão responsável pelo programa espacial norte-americano aponta a necessidade de apresentação de trabalho documentado dos testes de desempenho, demonstrando consistência com as previsões analíticas (NASA, 2013).

Nesse sentido, a ABNT NBR ISO 16290:2015 é mais específica quanto ao modelo e aos testes de desempenho. A Norma Brasileira de Padronização prescreve que, para demonstrar as funções críticas e o desempenho do elemento sem ambiguidades, se deve usar um modelo representativo, em termos de formato, configuração e função, do sistema real a ser desenvolvido.

Além de determinar que os testes de desempenho estejam de acordo com as previsões analíticas, e explicar que o desempenho do elemento como um todo está, em princípio, demonstrado, a ABNT NBR ISO 16290:2015 pondera ser conveniente estabelecer um cronograma de desenvolvimento do elemento. Isso ocorre porque, no TRL 6, ainda há possibilidade de riscos remanescentes com relação ao desempenho do elemento – por exemplo, possíveis riscos associados à falha na identificação das funções críticas, falta de integralidade no plano de verificação associado e/ou subestimativa dos efeitos de acoplamento entre as peças do elemento, que podem tornar o modelo inadequado para eliminar as incertezas acaso existentes (ABNT, 2015).

Em continuação ao exemplo do veículo lançador, a ABNT NBR ISO 16290:2015 explica como ocorre a demonstração de um protótipo funcional em ambiente de gravidade zero. De acordo com a Norma Brasileira de Padronização, no TRL 6, o gerenciamento do propelente do estágio superior do veículo lançador, que pode ser reacendido, em ambiente de gravidade zero é identificado como uma função crítica. Uma demonstração do protótipo, em escala real, do estágio superior é feita com testes de desempenho das peças críticas, usando voos parabólicos e veículos de sondagem. Nesse exemplo, relevante é o ambiente de gravidade zero, que simula os aspectos-chave do ambiente operacional para o veículo lançador. Assim, o protótipo em escala real das peças críticas do estágio superior do veículo lançador deve ser capaz de responder a testes de desempenho de acordo com as previsões analíticas.

Fica, portanto, evidente que o nível TRL 6 é um marco no processo de desenvolvimento de tecnologia. Sua importância pode ser confirmada pela certificação que o DOD deve dar ao Congresso norte-americano garantindo que a tecnologia foi demonstrada em um ambiente relevante antes de dar seguimento ou desistir de projetos de aquisição de sistema de defesa (DOD, 2009). Ademais, o TRL 6 é também usado como o nível exigido pela Nasa para a inserção de *design* no desenvolvimento de uma tecnologia (NASA, 2007, 2008, 2013).

Mankins (2002, 2009b) calcula que, no TRL 6, os custos com pesquisas de P&D podem ser considerados altos e tendem a ser similares aos do TRL 7. Os custos são semelhantes porque costumam ser classificados, em sua maioria, como específicos para a tecnologia ou para demonstração a ser realizada. Porém, os investimentos necessários para se alcançar o TRL 6 costumam ser até mesmo duas ou três vezes menos expressivos que os demandados para a mesma disciplina no TRL 7.

Normalmente, as atividades que envolvem o processo de amadurecimento de uma tecnologia no TRL 6 são realizadas por instituições voltadas para o desenvolvimento de projetos de P&D que, devido aos elevados custos, buscam financiamento por meio de fundos do governo, investimentos da indústria e/ou de bancos privados (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

- TRL 7: Demonstração de protótipo do sistema em ambiente operacional

Essa é mais uma etapa nos níveis de prontidão da tecnologia. O TRL 7 é um passo significativo, mas opcional, no processo de maturação da tecnologia que requer a demonstração efetiva de um protótipo real do sistema em ambiente operacional. No passado, a Nasa costumava não implementar os testes do nível 7 nos projetos de desenvolvimento de tecnologia, porque eram vistos como pouco necessários. No entanto, hoje em dia, tanto a Nasa como a ESA consideram relevante a demonstração da prontidão da tecnologia no nível 7 quando há riscos técnicos elevados ou o nível de inovação do sistema precisa alcançar os fins e objetivos da missão (ESA, 2008; MANKINS, 1995, 2009b).

Um dos exemplos clássicos de demonstração de tecnologia no TRL 7 é o veículo robótico de exploração Sojourner.⁷ A prontidão da tecnologia desse veículo foi efetivamente demonstrada no ambiente operacional, com o sucesso da missão Mars Pathfinder em 1997/1998, e foi usada em microrrobôs em missões posteriores à de Marte (MANKINS, 2009b).

Nesse nível, o protótipo deve ser construído em uma escala bem próxima ou exatamente nas mesmas proporções do sistema operacional planejado, e a demonstração da tecnologia deve ocorrer em um ambiente efetivo para sua operação. O TRL 7 tem como principal objetivo assegurar a engenharia do sistema e a confiança da gerência no desenvolvimento do sistema (ESA, 2008).

Isso significa dizer que, assim como o TRL 6, esse sétimo nível de maturação da tecnologia está mais voltado para garantir a confiança no sistema construído e na gestão do desenvolvimento da tecnologia do que atender às finalidades das atividades de P&D direcionadas à tecnologia. Com isso, a demonstração deve compreender a aplicação prática de um protótipo operacional, mesmo que nem todas as tecnologias do sistema possam ser testadas nesse nível.

A ABNT NBR ISO 16290:2015 prescreve que o protótipo precisa refletir plenamente todos os aspectos do projeto do modelo de voo e operar em um ambiente que replique todas as condições necessárias do ambiente operacional real para, assim, demonstrar que o sistema atual é capaz de operar efetivamente naquele ambiente. Acrescenta ainda a Norma Brasileira de Padronização que, no caso de demonstrações no solo, os testes de desempenho são concebidos para representar o ambiente operacional esperado com margens adequadas. O protótipo do elemento/sistema é, então, construído para ser submetido a uma série de testes no solo e, portanto, não é usado para voo, uma vez que é, em geral, testado em excesso. Já no caso do ambiente operacional de voo ser mandatório para a demonstração do desempenho, o protótipo é construído de forma a ser a primeira representação do elemento/sistema que vai voar (ABNT, 2015).

Voltando ao exemplo do veículo lançador, a ABNT NBR ISO 16290/2015 esclarece que a demonstração de seu desempenho não pode ser alcançada unicamente por meio de testes no solo, e requer testes operacionais completos no espaço. Desse modo, assim como ocorreu com o veículo robótico Sojourner na missão Mars

⁷Cf. Figura 5, p. 44, desta dissertação.

Pathfinder da Nasa, no caso do veículo lançador de satélite ou foguete, o protótipo é geralmente construído para ser a primeira representação efetiva do sistema (TRL 7). O primeiro voo é considerado como a demonstração de desempenho no ambiente operacional de gravidade zero (TRL 8).

Mankins (2002, 2009b) atenta para o fato de que, no TRL 7, os custos com pesquisas de P&D são estimados como muito altos e específicos para a demonstração da tecnologia. Embora os custos para se atingir esse nível de prontidão sejam considerados semelhantes aos incorridos no TRL 6, geralmente, os investimentos feitos no TRL 7 chegam a ser duas ou mais vezes maiores do que os do nível anterior. Isso ocorre porque os investimentos necessários para que a tecnologia chegue ao nível sete de prontidão podem representar uma fração significativa do custo de desenvolver a aplicação do sistema final, dependendo da escala e da fidelidade da demonstração do protótipo a ser implementado.

No contexto da Nasa, esses custos podem comprometer uma parcela significativa dos investimentos das fases C e D do ciclo de vida de um projeto de P&D. Assim como ocorre no TRL 6, as atividades que envolvem o processo de amadurecimento de uma tecnologia no TRL 7 são realizadas por instituições voltadas para o desenvolvimento de projetos de P&D que, devido aos custos altos, buscam financiamento por meio de fundos do governo, investimentos da indústria e/ou de bancos privados (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

- TRL 8: Sistema real completo e “qualificado para voo” por meio de teste e demonstração

Todas as tecnologias a serem aplicadas em um sistema real devem passar pelo TRL 8. Geralmente, esse nível de maturidade representa o fim do processo de desenvolvimento de um sistema para a maioria dos elementos que compõem uma tecnologia. Obviamente, os esforços para o desenvolvimento de um sistema deverão envolver uma variedade de metodologias e ferramentas de processos e projetos de gerenciamento, bem como um número significativo de métodos e programas de gerenciamento de tecnologia da informação. Na maioria dos casos, as tecnologias incorporadas já devem estar avaliadas nos níveis TRL 6 ou TRL 7 antes do processo de desenvolvimento do sistema ser formalmente iniciado (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Mankins (2002, 2009) menciona, a título ilustrativo, o desenvolvimento de um sistema de transporte no espaço. Para a Nasa, o TRL 8 pode compreender a conclusão dos processos de *design*, desenvolvimento, teste e avaliação (*design, development, test and evaluation* – DDT&E), que vão desde uma primeira unidade teórica até um novo tipo de veículo. O TRL 8 também inclui casos nos quais uma nova tecnologia é integrada a um sistema existente em vez de desenvolver um sistema completamente novo – por exemplo, o processo de carregar e testar com sucesso um novo *software* de controle de algoritmo no computador a bordo do telescópio espacial Hubble enquanto em órbita⁸ (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Nesse contexto, a Nasa recomenda, como critério de saída do TRL 8, que seja apresentada a documentação sobre os testes de desempenho, comprovando as previsões analíticas. Essa documentação faz parte de um conjunto de trabalhos de revisão e relatórios que atendem às normas da Nasa. Normas, como “Requisitos e procedimentos de engenharia de sistemas” (NPR 7123.1B), “Requisitos de gestão de programas e projetos de pesquisa e tecnologia” (NPR 7120.8) e o “Manual de engenharia de sistemas” (SP-6105), que fornecem os conceitos e requisitos para a elaboração de uma série de avaliações periódicas do desenvolvimento de sistemas de engenharia durante o ciclo de vida de projetos e/ou programas que envolvem atividades de P&D (NASA, 2007, 2008, 2013).

Já o manual da ESA enumera, entre as evidências que considera apropriadas para a avaliação da maturidade da tecnologia no TRL 8, algumas necessidades: apresentação de documentação contendo a descrição clara da unidade de produção do sistema real; o modo como essa unidade vai ser fabricada, operada e integrada aos sistemas do cliente e/ou ao sistema de sistemas; a descrição detalhada do projeto do cliente e/ou do sistema de sistemas, de sistema resultante e de requisitos ambientais que a nova tecnologia deve satisfazer dentro do conteúdo da aplicação prevista.

Ademais, o manual da agência espacial europeia requer informações adicionais, tais como: descrição clara dos resultados dos testes realizados utilizando a unidade de produção; indicação de como os resultados dos testes de qualificação e ambiente são compatíveis com os requisitos e ambientes operacionais esperados; delineamento de todas e quaisquer referências documentando os resultados de análises e modelagem, projetos de sistemas, testes e demonstrações realizados (ESA, 2008).

⁸Cf. Figura 8, p.71 desta dissertação.

Para estar “qualificado para voo”, a ABNT NBR ISO 16290:2015 preconiza que o elemento em consideração tem que estar integrado ao sistema real. Assim, todas as tecnologias precisam alcançar o oitavo nível de prontidão para que o sistema real desenvolvido seja aceito como pronto para voar, da mesma forma que ocorre com uma espaçonave (ABNT, 2015).

Sem rodeios, Mankins (2002, 2009b) informa que os custos para atingir o TRL 8 são específicos tanto para a missão como para os requisitos que o novo sistema deve atender e, usualmente, considerados muito altos. De fato, sem querer assustar o cliente, o relator dos TRLs alerta que esses custos são normalmente maiores do que a soma dos custos de todos os níveis anteriores, multiplicada por um fator de cinco a dez vezes. Embora os custos para se atingir esse nível sejam considerados semelhantes aos incorridos no TRL 6, geralmente, os investimentos feitos para se alcançar o TRL 8 chegam a ser duas ou mais vezes maiores para a mesma área de disciplina.

No contexto da Nasa, esses custos podem significar uma fração dos investimentos das fases C e D do ciclo de vida de um projeto, como os custos de concepção e desenvolvimento do sistema por meio da primeira unidade teórica. Assim como ocorre nos TRL 6 e 7, as atividades que envolvem o processo de amadurecimento de uma tecnologia no TRL 8 são realizadas por instituições voltadas para o desenvolvimento de projetos de P&D que, devido aos custos muito altos, buscam financiamento em fundos do governo, investimentos da indústria e/ou de bancos privados (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

- TRL 9: Sistema real “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida

O TRL 9 é o último nível de amadurecimento da tecnologia alcançado por um sistema real quando lançado e operado com sucesso. Todas as tecnologias que constituem esse sistema real devem estar integradas e operando plenamente. Por isso, o TRL 9 abrange a finalização dos últimos aspectos nos consertos de pequenos defeitos encontrados no desenvolvimento de um sistema real (ESA, 2008). Como esclarece a ABNT NBR ISO 16290/2015, o elemento que foi qualificado para voo em TRL 8 precisa estar integrado ao sistema final e pronto para operar em missão bem-sucedida (ABNT, 2015).

Mankins (2002, 2009b) pondera que, em quase todos os casos, os últimos aspectos do conserto de uma falha no processo de desenvolvimento de um sistema não ocorre até que o sistema real seja implementado pela primeira vez em uma missão bem-sucedida. Para a Nasa, são pequenos ajustes e pequenas alterações para corrigir problemas que podem ser encontrados até mesmo após o lançamento do sistema real. O relator dos TRLs explica que é comum haver a necessidade de pequenas correções (como a de um *bug* no *software*) ou alterações de procedimentos operacionais para resolver problemas detectados após o lançamento do sistema real no espaço. Normalmente, essas pequenas correções e alterações são efetuadas em um período de 30 dias após o lançamento do sistema espacial em missão bem-sucedida (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Apesar de permitir pequenas correções e alterações, o TRL 9 não prevê melhorias no sistema. As atualizações implicam um novo processo de desenvolvimento do sistema e, portanto, a nova tecnologia deve ser avaliada em nível adequado da escala TRLs. Voltando ao exemplo do veículo lançador, se tiver alcançado TRL 9 com operação em missão bem-sucedida, não poderá ter atualização de seu motor avaliada nesse último nível. Isso ocorre porque o desenvolvimento de novas capacitações do motor do veículo lançador depende dos esforços em pesquisa e desenvolvimento do sistema e, portanto, a prontidão da nova tecnologia deverá ser avaliada de acordo com o estado da arte em que se encontra (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Outros exemplos fornecidos pela Nasa para uma tecnologia operacional em TRL 9 são as células de combustível que combinam hidrogênio e oxigênio para gerar a eletricidade usada pelo ônibus espacial da Nasa. Ora, se um engenheiro fosse sugerir uma melhoria significativa para a tecnologia de células de combustível, então, a nova ideia seria avaliada em TRL 1, com princípios básicos observados e relatados, e teria que seguir o próprio caminho pelo processo de amadurecimento até o TRL 9, no qual um novo sistema real seria demonstrado em voo por meio de operações em missão bem-sucedida. Enquanto isso, a concepção da célula de combustível original permaneceria em TRL 9 (BANKE, 2010).

Esse último nível de prontidão da tecnologia requer, então, que o sistema seja operado no ambiente para o qual foi originariamente planejado, e com as características de desempenho que satisfaçam os requisitos do sistema e da missão. A Nasa evidencia, como critério de saída do TRL 9, a apresentação de resultados operacionais de missão

devidamente documentados. Os trabalhos sobre esses resultados contêm a conclusão do processo de maturidade da tecnologia. Eles traduzem o caminho percorrido pela tecnologia desde o TRL 1 até o TRL 9.

Em outras palavras, os resultados são a finalização de um processo de amadurecimento de uma tecnologia, que se inicia com princípios básicos observados e relatados e termina com a demonstração do sistema real em voo, por meio de operações em missão bem-sucedida. Assim, a documentação dos resultados operacionais da missão bem-sucedida atende a normas de procedimentos e requisitos da Nasa, especialmente com relação a custos, cronograma de tempo, segurança, e qualidade do sistema real, entre outros (NASA, 2007, 2008, 2013).

Nesse contexto, a ESA lista em seu manual, entre as evidências que considera apropriadas para a avaliação da prontidão da tecnologia no TRL 9, a apresentação de documentação, descrevendo detalhadamente o sistema lançado e sua funcionalidade planejada com os requisitos ambientais e de operabilidade; o método utilizado para a verificação de operações, com a identificação dos testes realizados acompanhados de argumentos convincentes; indicação de possíveis conexões com os testes de desempenho de componente/subsistema feitos anteriormente, incluindo as operações do sistema (ESA, 2008).

Os níveis TRL 8 e TRL 9 abrangem, portanto, o processo de teste, lançamento e operação do sistema real. Porém, a principal diferença entre esses dois últimos níveis está nos resultados dos últimos passos de lançamento e operação que deverão classificar o sistema como “demonstrado em voo”. Enquanto o TRL 8 compreende a construção de uma nova aeronave ou espaçonave “qualificada para voo”, o TRL 9 significa voar essa aeronave ou lançar essa espaçonave no espaço e, após o comissionamento, operá-la em missão bem-sucedida. Isso significa dizer que o TRL 9 garante a operabilidade da tecnologia em termos de desempenho, confiabilidade e rastreabilidade de todas as informações envolvidas (MANKINS, 1995, 2002, 2009b; ABNT, 2015).

Mankins (2002, 2009) constata que os custos para atingir esse último nível do processo de amadurecimento da tecnologia são específicos para a missão a ser cumprida. Embora os considere normalmente elevados, o relator dos TRLs estima que esses custos seriam significativamente inferiores aos incorridos no TRL 8. No entanto, ele acredita que as atividades no TRL 9 só podem ser realizadas por uma missão formal

ou organização direcionada ao desenvolvimento de operações (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

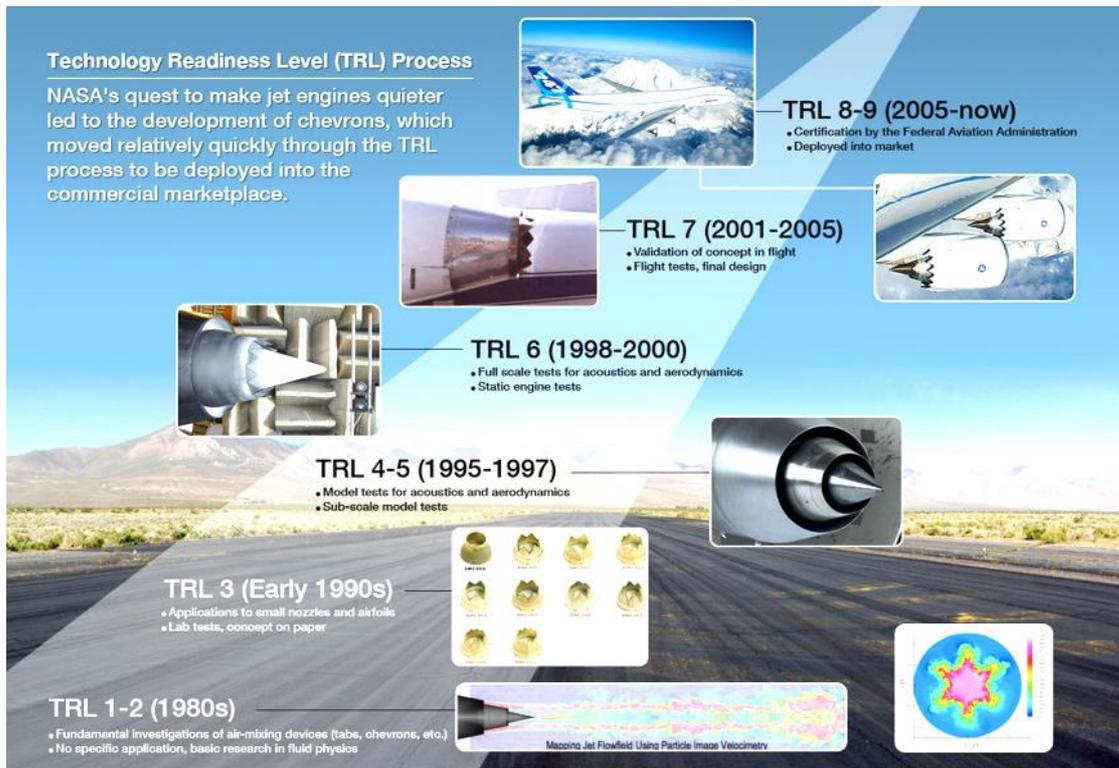


Figura 9 - Esquema do processo dos Níveis de Prontidão de Tecnologia (TRLs) para diminuir o barulho das turbinas dos aviões a jato.

Fonte: BANKE, 2010.

Para complementar o entendimento sobre os TRLs, apresentamos a seguir o Quadro 4, referente à relação entre os TRLs e os custos estimados para alcançar cada um dos níveis de prontidão de tecnologia ao longo do ciclo de vida de um projeto de P&D (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

Quadro 4 - Relação entre TRLs e custos estimados para um projeto de P&D

NÍVEL	DEFINIÇÃO	DESCRIÇÃO DOS CUSTOS
TRL 1	Princípios básicos observados e relatados.	Custo tipicamente muito baixo , considerado específico para o desenvolvimento da tecnologia. O investimento é originado de programas de pesquisa científica.
TRL 2	Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados.	Custo usualmente muito baixo comparado aos investimentos dos níveis subsequentes, e considerado específico para o desenvolvimento da tecnologia. Geralmente, o investimento é originado de estudos de conceitos avançados ou de programas de pesquisa básica.
TRL 3	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característico.	Custo relativamente baixo , mas único para a tecnologia envolvida; é bem menor que o custo de atingir TRL 4 para a mesma tecnologia.
TRL 4	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente de laboratório.	Custo relativamente baixo ou moderado . O investimento vai ser específico para a tecnologia, mas provavelmente será bem maior do que o requerido para atingir TRL 3.
TRL 5	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente relevante.	Custo usualmente moderado e específico. O investimento dependerá da tecnologia a ser desenvolvida, mas provavelmente será muitos múltiplos do custo incorrido para atingir TRL 4 para a mesma tecnologia.
TRL 6	Demonstração de modelo ou protótipo do subsistema/sistema em um ambiente relevante.	Custo específico para a tecnologia e para sua demonstração. Entretanto, será tipicamente uma fração do custo a ser incorrido para atingir TRL 7, se a demonstração for no solo e quase o mesmo, se for exigida no espaço.
TRL 7	Demonstração de protótipo do sistema em um ambiente operacional.	Custo específico para a implementação dos detalhes da tecnologia e sua demonstração. Poderá corresponder a uma fração significativa dos custos para atingir TRL 8.
TRL 8	Sistema real completo e “qualificado para voo” por meio de teste e demonstração.	Custo específico para a missão; é tipicamente o maior custo específico para uma nova tecnologia. O investimento consome quase todo o orçamento necessário para atingir as fases C e D do projeto, mediante a primeira unidade teórica para uma demonstração do sistema.
TRL 9	Sistema real “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida.	Custo específico para a missão; é tipicamente menor que o custo do TRL 8, e inclui o custo de lançamento mais 30 dias de operação em missão.

Fonte: Quadro traduzido e adaptado (MANKINS, 1995, 2002, 2009b).

6 AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DE TECNOLOGIA

Neste sexto capítulo, descreveremos o processo de avaliação da maturidade de tecnologia ao longo do ciclo de vida de um projeto de P&D. Primeiro, buscamos entender como a Nasa e outras organizações aplicam a escala TRLs em seus projetos. Em seguida, apresentaremos o roteiro de um processo sistemático recomendado pela Nasa. Esse roteiro traçará o passo a passo da aplicação de práticas padronizadas de engenharia de sistemas para realizar uma avaliação da maturidade de tecnologia.

Como toda ferramenta de gestão, a abordagem do método dos níveis de prontidão de tecnologia também possui limitações e benefícios. Assim, iremos assinalar alguns pontos considerados relevantes, sem, contudo, esgotar o assunto neste trabalho. Por fim, encerraremos o capítulo com uma descrição breve sobre as recentes propostas de se incluir mais um nível, o TRL 10, à escala da Nasa.

6.1 Aplicação da escala TRLs

Além da expansão da escala de sete para nove níveis, os TRLs evoluíram pouco dentro da Nasa. A administração do programa espacial norte-americano determinava que seus projetos identificassem a prontidão da tecnologia mediante a aplicação da escala TRLs, mas a atribuição de estimar o nível de TRL ficava exclusivamente a critério do desenvolvedor da tecnologia. De 1989 a 2006, não havia na Nasa quaisquer requisitos de procedimentos, guias ou manuais que estabelecessem regras padronizadas de como elaborar uma avaliação da maturidade de tecnologia. Como não havia uma regra preestabelecida, a apreciação dos TRLs variava extensamente (GRAETTINGER et al., 2002; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003; BILBRO, 2001a, 2007b; NOLTE, 2008).

Em 1999, quando o GAO recomendou em seu relatório (GAO/NSIAD 99) que o DOD viesse a adotar a escala TRLs (UNITED STATES, 1999), havia apenas o “Relatório branco” de Mankins (1995) com a descrição dos nove níveis de prontidão de tecnologia, e a calculadora AFRL TRL para *hardware* e *software* (versão 1.1/agosto de 2002), desenvolvida pelo engenheiro William Nolte para o Laboratório AFRL (GRAETTINGER et al., 2002; MANKINS, 1995; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003).

Nesse contexto, Nolte desenvolveu a calculadora para auxiliar o AFRL na estimativa do nível de TRL de uma determinada tecnologia, com base nas respostas às perguntas feitas pela ferramenta. A versão 1.1 de 2002 para *hardware* foi desenvolvida a partir das definições da Nasa para os TRLs adotados pelo AFRL em 1999. Já a mesma versão da calculadora para *software* era fundamentada nas definições dos TRLs criadas pelo Exército norte-americano com algumas modificações feitas por Nolte quanto à verificação e validação dos programas de computador ((NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003).

O DOD seguiu as recomendações do GAO e do Congresso Nacional dos Estados Unidos, estabelecendo em suas Diretivas DOD 5000.1 e Instruções DoD 5000.2 a obrigatoriedade de avaliação da maturidade da tecnologia. Ademais, o “Guia interino do DoD de aquisição de defesa” (Instrução DOD 5000.2-R), de 30 de outubro de 2002, recomendava o uso da escala TRLs ou algum método equivalente para determinar a prontidão de tecnologia e acessar o programa de risco, mas não informava como proceder à avaliação. Esse guia fornecia o quadro DOD dos TRLs, baseado na escala da Nasa, com pequenas adaptações para seus sistemas de aquisição de defesa, no entanto, faltavam critérios detalhados de como realizar essa avaliação (UNITED STATES, 2000, 2002a, 2002b, 2003a).

Em 2001, Heslop, McGregor e Griffith (2001) observaram no estudo conhecido como o “Modelo Cloverleaf para a avaliação de transferência de tecnologia” (*The Cloverleaf model for technology transfer assessment*), que após pesquisas com universidades canadenses e norte-americanas sobre o uso dos TRLs, os resultados mostraram que a maioria dos laboratórios de pesquisa universitários possuía formulários oficiais de informação ou listas de conferência informais (*checklists*) para avaliar tecnologias. Porém, muitos profissionais da área de transferência de tecnologia dessas universidades relataram que eles contavam principalmente com seus instintos na hora de avaliar tecnologias.

Em 2002, Graettinger et al. (2002) concluíram em relatório para o Cecom que, após entrevistar várias equipes de desenvolvimento de projetos, não encontraram, à época, nenhum procedimento padrão que pudesse ser identificado como abordagem comum usada para aplicação da escala TRLs na avaliação da maturidade de tecnologia. Segundo os pesquisadores, a equipe do Laboratório AFRL informou nas entrevistas que usavam a calculadora AFRL TRL como ferramenta para conduzir suas avaliações ou

promover discussões entre as partes interessadas em desenvolver tecnologias. Já os auditores do GAO, quando entrevistados, disseram que trancavam todas as partes interessadas em uma sala, onde, juntas, discutiam as descrições dos TRLs até chegarem a uma decisão em conjunto sobre o nível de prontidão de uma determinada tecnologia. Graettinger et al. (2002) ressaltaram, contudo, que esse modo de avaliação praticado pelo GAO poderia levar até dois dias para se chegar a uma conclusão.

Diferentemente, os gerentes de projetos da Agência de Projetos de Pesquisa Avançada em Defesa (*Defense Advanced Research Projects Agency – Darpa*) esclareceram, em conversas com Graettinger et al. (2002), que usavam pequenas equipes de três ou quatro pessoas, incluindo o investigador do programa (*program investigator – PI*). Nesse processo, cada membro da equipe fazia sua estimativa do nível de prontidão em que se encontrava a tecnologia por eles avaliada, independentemente dos demais, e as diferenças eram discutidas pela equipe até que todos chegassem a um consenso. Já os gerentes do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento de Comunicações Eletrônicas do Cecom (*Research and Development in Electronics Communications – RDEC*) explicaram que reuniam o time de gerentes para que, em conjunto, determinassem o nível de prontidão de uma tecnologia baseados no progresso dos trabalhos realizados, bem como nos resultados de testes de laboratório e de campo alcançados.

Graettinger et al. (2002) concluíram, em seu relatório, que a avaliação da maturidade de tecnologia acarretava infundáveis discussões e negociações entre as partes interessadas para se chegar a um consenso sobre o nível de TRL de determinada tecnologia. Em consequência, a necessidade de se avaliar inúmeras tecnologias resultava em excesso de horas de trabalho gastas entre os desenvolvedores de tecnologias e os engenheiros do Cecom sobre a implementação da escala TRLs. Assim, os autores recomendaram, entre outras medidas, padronização do processo de avaliação da maturidade de tecnologia e o uso da calculadora AFRL TRL para auxiliar nesse processo.

A partir de 2003, o DOD começou a desenvolver o próprio guia de avaliação da prontidão de tecnologia, apoiado nos relatórios anuais do GAO e nas exigências do Congresso norte-americano. Com isso, o DOD aprovou novas versões de suas diretivas e instruções, além de aperfeiçoar o processo de avaliação da prontidão da tecnologia,

atualizando periodicamente as versões de seus manuais e guias, bem como sua versão da escala dos TRLs (UNITED STATES, 2003a, 2015a).

Nesse mesmo caminho, a Nasa (2007) também trilhou os procedimentos para a avaliação da tecnologia (*technology assessment* – TA) no Apêndice G de seu “Manual de engenharia de sistemas”. A par do fato de o tema ter sido inserido no manual apenas como um apêndice, seu objetivo foi claramente o de descrever um processo sistemático que pudesse ser usado como exemplo. A ideia era desmistificar a TA, mostrando como aplicar práticas padronizadas de engenharia de sistemas.

Em adição, a Nasa estabeleceu os passos necessários para traçar o processo de avaliação da maturidade de tecnologia (*technology maturity assessment* – TMA) nos “Requisitos de gestão dos programas e projetos de pesquisa e tecnologia” (*NASA research and Technology Program and Project Management Requirements* – NPR 7120.8). Já a escala TRLs para *hardware* e *software* está definida no Apêndice E dos “Requisitos e procedimentos de engenharia de sistemas” (*NASA systems engineering processes and requirements* – NPR 7123.1B). Com isso, a Nasa sedimentou o entendimento de que a TMA é uma ferramenta necessária para dar suporte ao projeto de desenvolvimento de tecnologia (NASA, 2008, 2013).

O Apêndice B apresenta o quadro da escala TRLs da Nasa, com as descrições dos níveis de prontidão da tecnologia de *hardware* e *software*, correspondentes a cada um dos níveis, além de uma coluna contendo um conjunto de critérios de saída para o respectivo TRL. Esses critérios de saída são evidências a serem apresentadas para demonstrar que o nível correspondente de TRL foi alcançado no processo de desenvolvimento da tecnologia (NASA, 2013).

6.2 Avaliação da maturidade de tecnologia

Para a Nasa, o processo de avaliação da tecnologia (TA) divide-se em duas partes que se complementam. Começa com a avaliação da maturidade de tecnologia (TMA), que utiliza a escala TRLs para medir em que nível de prontidão se encontra determinada tecnologia em um dado espaço de tempo; e prossegue com a avaliação do avanço do degrau de dificuldade (*advancement degree of difficulty assessment* – AD²) para desenvolver uma compreensão do que é necessário fazer para se avançar ao nível seguinte de prontidão da tecnologia (NASA, 2007).

Em verdade, os engenheiros realizam várias avaliações da tecnologia ao longo do ciclo de vida do projeto de P&D, que auxiliam na tomada de decisão em pontos de transição entre as fases. Esses pontos são conhecidos como pontos-chave de decisão (*key decision points – KDPs*), atualmente estabelecidos de acordo com os NPR 7120.8 (NASA, 2007, 2008, 2013).

Os KDPs ocorrem quando a autoridade encarregada da tomada de decisão, apontada também como gerente do projeto, determina que o projeto está apto para avançar para a próxima fase de seu ciclo de vida. Os KDPs servem como um portal, através do qual o projeto deve passar. Para apoiar o processo de decisão, os KDPs são normalmente precedidos por uma ou mais avaliações e/ou revisões. Assim, em cada KDP, o gerente promove uma avaliação da tecnologia e/ou revisão do *status* do projeto para garantir que ele esteja em conformidade com os procedimentos estabelecidos pela Nasa e os requisitos do projeto (NASA, 2007, 2008, 2012a, 2013).

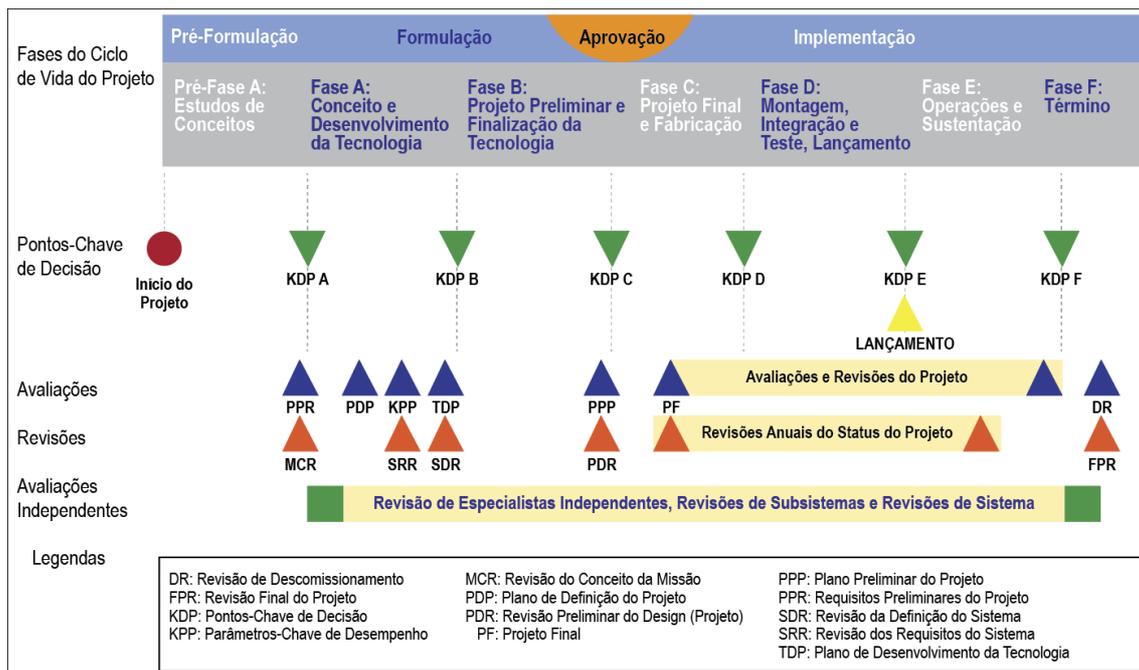


Figura 10 - Ciclo de vida de um projeto de P&D.

Fonte: Figura traduzida e adaptada (NASA, 2007, 2008, 2012a, 2013).

Na Figura 10, os KDPs estão assinalados na primeira faixa de triângulos invertidos na cor verde, identificados por letras maiúsculas, correspondentes a cada uma das fases do ciclo de vida do projeto. Os KDPs marcam os pontos de tomada de decisão do gerente do projeto para passar de uma fase a outra do ciclo de vida do projeto. Esses

pontos representam uma transição entre fases, na qual o gerente realiza uma série de atos de gestão que garante o amadurecimento da tecnologia e o sucesso do projeto.

Quadro 5 - Relação das principais avaliações a serem efetuadas para a transição entre fases do ciclo de vida de um projeto de P&D da Nasa.

KDP	FASES DO PROJETO	DESCRIÇÃO
A	Transição da Pré-fase A para a Fase A	Requer uma avaliação das necessidades de potenciais tecnologias <i>versus</i> avaliação da maturidade de tecnologias, em face dos níveis de prontidão atuais e os previstos – TMA, bem como das potenciais oportunidades para usar fontes de tecnologia comerciais, acadêmicas e de outra entidade governamental. Essa avaliação é incluída como parte da minuta a ser acrescentada à linha de base da TMA. Elaborar os requisitos preliminares do projeto.
B	Transição da Fase A para a Fase B	Requer um plano de desenvolvimento da tecnologia (<i>technology development plan – TDP</i>) que identifique as tecnologias a serem desenvolvidas, os sistemas herdados a serem modificados, caminhos alternativos a serem perseguidos, posições de recuo e requisitos de desempenho correspondentes, metas, métricas e pontos-chave de decisão. Esse plano deve ser incorporado ao plano preliminar do projeto (<i>preliminary project plan – PPP</i>).
C ... D	Transição da Fase B para as Fases C/D	Requer uma revisão anual do <i>status</i> do projeto. No fim, é necessário a apresentação de um relatório de avaliação da prontidão de tecnologia (<i>technology readiness assessment report– Trar</i>), demonstrando que todos os sistemas, subsistemas e componentes alcançaram um nível de prontidão tecnológica com evidência comprovada de qualificação em ambiente relevante.

Fonte: Quadro traduzido e adaptado (NASA, 2007).

Para que um projeto venha a ser bem-sucedido, é necessário que os engenheiros tenham visão plena da prontidão da tecnologia desenvolvida ou do que é necessário fazer para desenvolvê-la e fazê-la alcançar o nível desejado, ou seja, o nível de prontidão que permita sua incorporação em um sistema ou produto final. Portanto, a avaliação da maturidade de tecnologia por meio da identificação dos TRLs é considerada um processo de engenharia de sistemas capaz de determinar o que foi demonstrado e sob quais condições (NASA, 2007, 2008).

O processo de TA é iterativo e começa com a atividade de formulação do projeto. Na transição da Pré-fase A para a Fase A do ciclo de vida do projeto, os engenheiros devem realizar avaliação preliminar das necessidades tecnológicas potenciais, em face dos níveis de prontidão atuais e os previstos, bem como de potenciais oportunidades de recursos de fontes governamentais, comerciais, acadêmicas e de outras instituições para desenvolver a tecnologia. Essa avaliação preliminar servirá como minuta para a avaliação da linha de base da maturidade da tecnologia do projeto (NASA, 2007, 2008).

Na transição da Fase A para a Fase B do ciclo de vida do projeto, a avaliação tem como finalidade fixar uma linha de base inicial do nível de prontidão no qual se encontra a tecnologia requerida pelo sistema (TMA base). A partir dessa linha de base, o gerente pode monitorar a evolução da tecnologia. Essa avaliação inicial permite identificar o TRL de cada sistema, subsistema e componente. A TMA base descreve o estado da arte da tecnologia que se pretende desenvolver e representa o nível de prontidão no qual ela se encontra (TRL atual), em comparação ao requerido pelo sistema, que poderá operar de forma segura em missões bem-sucedidas (TRL 9). O TRL atual e o requerido são, portanto, identificados na avaliação inicial (NASA, 2007, 2008, 2012a).

Uma avaliação da maturidade de tecnologia com o método TRLs poderá ser repetida n vezes e usada com outras métricas e relatórios técnicos de desempenho ao longo do ciclo de vida do projeto. A partir da avaliação inicial da maturidade tecnológica, constituída a linha de base, os engenheiros devem elaborar o TDP e os planos de previsão de custos, cronograma de tempo e mitigação dos riscos.

O TDP deve identificar as tecnologias críticas, a estrutura dos sistemas, subsistemas e componentes, os sistemas herdados, os caminhos alternativos, as posições de recuo e os requisitos de desempenho correspondentes, metas, métricas e pontos-chave de tomada de decisão. O processo de TA é, então, definido durante a atividade de formulação do projeto e atualizado durante a atividade de implementação, com as avaliações e revisões de *status* seguintes, que costumam ser feitas anualmente ao longo do ciclo de vida do projeto, como demonstra a Figura 10 (NASA, 2007, 2008, 2013).

Assim, as demais avaliações da maturidade da tecnologia e revisões anuais de *status* do projeto deverão ocorrer na transição da Fase C e das demais fases no decorrer do ciclo de vida do projeto. A evolução da tecnologia para níveis mais altos de prontidão exige avaliação de uma série de capacitações que envolve *design*, realização de análises, manufatura e testes de desempenho. Com a conclusão da formulação do projeto, uma avaliação da maturidade da tecnologia deverá ser feita pouco antes da revisão preliminar do *design* (*preliminary design review* – PDR).

No fim da implementação do projeto, os engenheiros devem realizar estudo sobre o impacto da tecnologia com base nas lições por eles apreendidas durante o ciclo de vida do projeto. Esse estudo serve de suporte para o Trar, que documenta o avanço

tecnológico exigido pelos sistemas, subsistemas e componentes, demonstrado mediante testes e análises (BILBRO, 2007b, 2007c, 2008a; NASA, 2007).

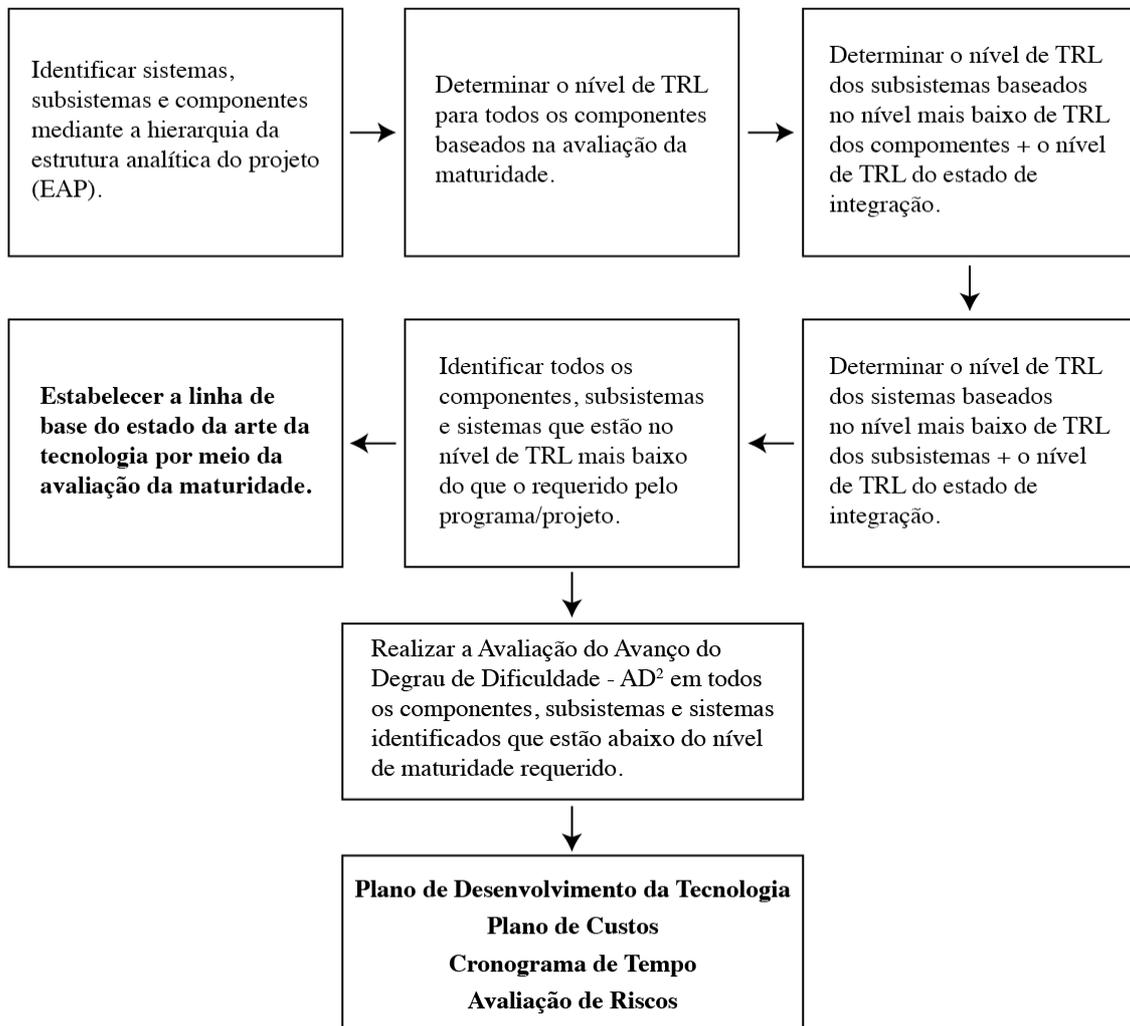


Figura 11 - Processo de Avaliação da Maturidade de Tecnologia (TMA) da Nasa.

Fonte: Figura traduzida e adaptada (NASA, 2007).

Na conclusão do projeto, o gerente deve nomear um grupo independente, que ficará responsável pela última avaliação da maturidade da tecnologia, devendo determinar o nível de TRL final alcançado (NASA, 2007, 2008, 2013).

A Nasa permite que o gerente adote para o projeto outra métrica que não os TRLs, mas determina que o sistema de medição utilizado mapeie e indique o nível de TRL da tecnologia, de acordo com a descrição contida no Apêndice E do NPR 7120.8 (NASA, 2008).

Essa norma de padronização da Nasa estabelece os 10 passos principais do processo de TMA, que abrangem as seguintes ações, a serem realizadas no âmbito do projeto de P&D:

1. Definir toda a terminologia adotada no processo de TMA ao longo do ciclo de vida do projeto, em especial os termos e as expressões utilizados na descrição dos TRLs (NASA, 2008, p. 41).

Uma avaliação uniforme depende da definição de termos e expressões. Segundo a Nasa (2207b, 2008, 2013), esse é o primeiro passo do processo de avaliação, porque a principal causa das dificuldades em se tentar atribuir um TRL a uma tecnologia reside na terminologia utilizada. Termos e/ou expressões, por exemplo, “placa de ensaio” e “ambiente relevante”, geram dúvidas quanto a sua interpretação. São originados em vários ramos da engenharia que, à época, tinham significados muito específicos para determinado campo do saber. Com sua popularização, passaram a ser utilizados em todos os campos da engenharia, ainda que, geralmente, tenham diferentes sentidos, que variam de disciplina para disciplina. A expressão “placa de ensaio” surgiu no campo da engenharia elétrica, no qual o uso original se refere a testar a concepção funcional de um circuito elétrico, preenchendo uma placa perfurada com componentes elétricos para verificar se funciona como o previsto (NASA, 2007, p. 297, 2008, p. 86-87, 2013, p. 35-42; 100-102; ABNT, 2015, p. 1-4).

O Apêndice C define os termos usados no presente trabalho, que acompanham a terminologia do desenvolvimento da tecnologia adotada no Apêndice J dos Requisitos NPR 7120.8 (NASA, 2008) e no Apêndice B dos Requisitos NPR 7123.1B (NASA, 2013).

2. Fornecer análise formal de brechas em áreas de necessidade de desenvolvimento da tecnologia, que dão suporte ao conteúdo do projeto, e identificar o processo para avaliação periódica, incluindo conclusão ou transição de tecnologias produzidas fora do projeto e introdução de novas tecnologias concebidas para o projeto (NASA, 2008, p. 41).

Mesmo na fase conceitual, é importante estabelecer critérios de avaliação significativos e métricas que permitam uma identificação clara das lacunas e deficiências no desempenho dos sistemas, subsistemas ou componentes, com o fim de evitar que importantes tecnologias escorreguem por possíveis brechas. Além disso, uma

avaliação global do sistema também deve ser feita em pontos-chave de tomada de decisão durante o ciclo de vida do projeto, buscando assegurar-se de que nada venha a cair nessas possíveis brechas (BILBRO, 2007b, 2007c, 2008a; NASA, 2007, 2013).

Nesse contexto, será necessário fazer chamadas de julgamento (*judgement calls*), com base em experiências passadas para determinar a similaridade de um dado elemento com relação às descrições de cada TRL. A título ilustrativo, devem ser esclarecidas dúvidas, como a de se saber se um elemento pode ser considerado um protótipo ou simplesmente uma placa de ensaio. Assim, para melhor avaliar desenvolvimento, análise e teste de desempenho de um elemento, é necessário descrever o que foi feito em termos de forma, configuração e função (*form, fit, and function*). Com isso, pode-se quantificar um elemento baseado no propósito a que se destina no projeto, bem como seu desempenho subsequente (NASA, 2007).

Por se tratar de uma fase conceitual, marcada pela ausência de um conhecimento adequado do sistema, em termos de sua arquitetura e do ambiente operacional, a maturidade da tecnologia não deve ser avaliada em um nível superior a TRL 4, ou seja, quando ocorre a verificação funcional do componente ou da maquete do sistema em ambiente de laboratório (BILBRO, 2001b, 2007b, NASA, 2007, 2013; ABNT, 2015). Vale lembrar, como já mencionado no capítulo 5, que, nesse nível TRL 4 e, conseqüentemente, nessa fase conceitual, a verificação do componente e/ou sistema é de baixa fidelidade, devendo a placa de ensaio ou maquete ser construída e operada para demonstrar a funcionalidade básica, os requisitos e as previsões de desempenho.⁹

3. Fornecer uma avaliação formal do TRL para cada nova tecnologia incorporada ao projeto e avaliar, anualmente, o progresso delas com relação às metas definidas para o nível de TRL desejado. A avaliação deve ocorrer nos níveis de sistema, subsistema e componente, de acordo com o descrito na estrutura analítica do projeto (NASA, 2008, p. 41).

O processo de avaliação de tecnologia faz uso de princípios e processos básicos de engenharia de sistemas e foi criado para ocorrer com a estrutura analítica do projeto (EAP), na sigla em inglês WBS (*project's work breakdown structure*), a fim de facilitar a incorporação dos resultados alcançados durante o ciclo de vida do projeto (BILBRO,

⁹Cf. item 5.1 sobre pesquisa avançada e fronteira *fuzzy* no desenvolvimento de tecnologia, p. 61, e item 5.2 sobre a descrição do TRL 4, p. 74-75.

2007b; NASA, 2007). Esse trabalho de desmembramento hierárquico da estrutura analítica do projeto em várias partes permite que cada nível de sistemas, subsistemas e componentes seja avaliado individualmente com mais precisão. Seu principal objetivo é olhar o projeto como um todo e quebrá-lo em pedaços para torná-lo mais gerenciável, facilitando o trabalho de planejamento e controle de custos, cronograma de tempo e conteúdo técnico. A EAP para projetos de desenvolvimento de tecnologia é definido no Apêndice K dos Requisitos NPR 7120.8 da Nasa (2008).

Importante, ainda, esclarecer que a EAP deve conter também o desmembramento hierárquico da estrutura analítica do produto (*product breakdown structure* – PBS), incluindo itens de *hardware*, *software*, e de tecnologia da informação (documentos, database etc.). Assim, os engenheiros devem identificar os sistemas, subsistemas e componentes do produto com base na EAP. Embora seja elaborado na fase conceitual, a avaliação preliminar de cada um dos sistemas, subsistemas e componentes por meio de PBS evita que tecnologias importantes escorreguem pelas brechas, como acima referido (NASA, 2007, 2008, 2012a).

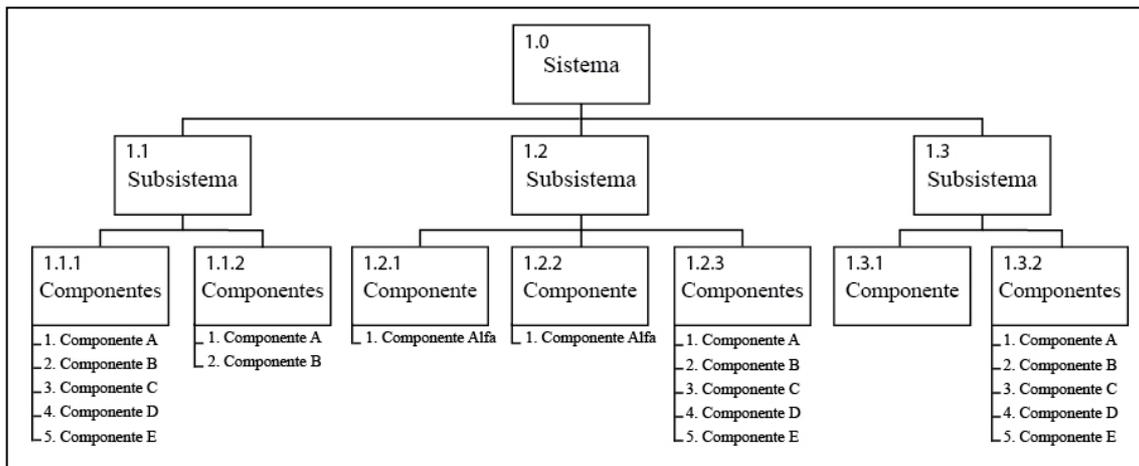


Figura 12 - Estrutura analítica de um produto, dividido em três camadas de sistema, subsistemas e componentes.

Fonte: Figura traduzida e adaptada (NASA, 2007, 2008).

4. O conceito de elo mais fraco (weakest link) deve ser utilizado para determinar a maturidade da tecnologia como um todo, na qual o TRL do sistema é determinado pelo do subsistema que tiver o menor nível no sistema que, por sua vez, é determinado pelo componente que tiver o mais baixo dos TRLs no subsistema (NASA, 2008, p. 41).

Esse conceito estabelece que o TRL do sistema como um todo é determinado pelo menor nível de prontidão presente no sistema. O processo de avaliação da maturidade de tecnologia se inicia no nível dos sistemas, identificando o TRL de cada um deles. Em seguida, o processo é repetido para todos os subsistemas, identificando os TRLs correspondentes de cada um dos subsistemas. Por fim, o processo é repetido, mais uma vez para todos os elementos de cada subsistema, identificando os TRLs correspondentes para cada um dos elementos contidos nos subsistemas.

Assim, o nível de TRL mais baixo fixado para um dos sistemas/subsistemas/elementos por meio da EAP será o nível de prontidão para todo o sistema. Logo, se qualquer elemento único de um subsistema estiver em TRL 2, então o sistema como um todo estará em TRL 2. Do mesmo modo, o processo de integração da tecnologia também afeta o TRL de cada sistema, subsistema e componente. Em outras palavras, todos os elementos podem estar em um TRL mais elevado, mas se nunca foram integrados como unidade, o nível de prontidão será o mais baixo para a unidade (BILBRO, 2006, 2007b, 2007c, 2008a; NASA, 2007).

5. O conteúdo da avaliação varia muito de acordo com o estado do projeto. Por exemplo, na fase conceitual, apenas os blocos básicos de construção são conhecidos, e os principais desafios identificados. No entanto, com o amadurecimento da tecnologia ao longo do ciclo de vida do projeto, as avaliações seguintes precisam ser mais detalhadas para refletir essa evolução (NASA, 2008, p. 41).

Assim, a primeira avaliação da maturidade de tecnologia deve ser realizada o mais cedo possível, de preferência na Pré-fase A do ciclo de vida do projeto, porque a linha de base da maturidade descreve o estado da arte da tecnologia no início de seu desenvolvimento. Embora essa avaliação inicial seja realizada durante a formulação do projeto, e mesmo que haja uma falta de aprofundamento de detalhes sobre o conceito da tecnologia, a linha de base da maturidade constituída na Pré-fase A aponta a direção dos avanços necessários para o desenvolvimento das tecnologias críticas. Nessa fase do ciclo de vida do projeto, a EAP preliminar também é delineada, identificando sistemas, subsistemas e componentes de forma mais genérica. Com isso, a primeira avaliação da maturidade de tecnologia não terá a fidelidade das demais avaliações a serem feitas ao longo do ciclo de vida do projeto. No entanto, ela vai certamente trazer informações valiosas para o desenvolvimento da tecnologia (NASA, 2007).

6. Com base na avaliação preliminar, deve-se preparar uma listagem dos elementos críticos da tecnologia (critical technology elements), ou seja, daqueles considerados indispensáveis ao atendimento de todos os requisitos da tecnologia e que representam risco substancial, bem como demandam aumento de custos e/ou do cronograma de tempo necessários para seu desenvolvimento (NASA, 2008, p. 41).

Ao iniciar a fase conceitual durante a formulação do projeto e, uma vez concluída a avaliação da maturidade de cada sistema, subsistema ou componente, de acordo com a arquitetura e o ambiente operacional para o qual foram delineados, chegue-se ao passo seguinte – avaliar o que é necessário fazer para promover a maturação da tecnologia a um nível em que ela possa ser incorporada ao produto ou sistema com sucesso, dentro das restrições de custo, cronograma de tempo e desempenho.

Isso reforça o argumento da necessidade de se realizar a avaliação da maturidade de cada um dos elementos identificados na EAP, pois é justamente nessa Pré-fase A do projeto que os engenheiros podem determinar em quais elementos críticos da tecnologia devem se concentrar para, no futuro, evitar incorrer em gastos, tempo e riscos desnecessários. Assim, a avaliação preliminar deve conter uma listagem de todas as tecnologias que são consideradas absolutamente essenciais para que o gerente do projeto possa alinhar os custos, o cronograma e os riscos a elas associados e suprir os requisitos exigidos para o avanço do nível de maturidade de cada elemento, subsistema, sistema ((BILBRO, 2006; NASA, 2007).

7. A avaliação dos elementos herdados deve considerar a aplicação pretendida e o ambiente operacional para o projeto em desenvolvimento, considerando, contudo, a forma como a tecnologia foi utilizada anteriormente (NASA, 2008, p. 41).

Esse passo é de suma importância no processo de avaliação da maturidade da tecnologia, especialmente quando seu desenvolvimento está associado ao uso de sistemas/subsistemas/elementos herdados. Como a tecnologia desses sistemas herdados é vista como madura por ter sido desenvolvida para outros produtos, ao reaproveitá-la, integrando-a em um novo produto, os engenheiros tendem a ignorar algumas etapas indispensáveis no processo de engenharia de sistemas. Ao serem incorporados em diferentes arquiteturas e operados em diferentes ambientes daqueles para os quais foram concebidos, os sistemas/subsistemas/elementos herdados costumam exigir modificações para se adaptarem ao novo produto (NASA, 2007).

Se a arquitetura e o ambiente mudam, então, a maturidade da tecnologia geralmente retorna para o nível 5 na escala TRLs, pelo menos inicialmente. Isso ocorre porque os sistemas herdados podem precisar de testes adicionais para o novo uso ou novo ambiente. Se em análise posterior for verificado que as características do novo ambiente são suficientemente próximas as do antigo, ou se a nova arquitetura for similar à anterior, então o sistema herdado pode ser reavaliado em TRL 6 ou 7 (NASA, 2007).

Isso ocorre porque, ao ser reaproveitado em projeto novo, o sistema herdado já não está mais no TRL 9, e será necessário realizar o desenvolvimento da tecnologia antes dela ser inserida ou integrada ao novo produto. Por um lado, o desenvolvimento da tecnologia de um sistema herdado poderá acarretar um impacto substancial nos custos, cronograma de tempo e riscos associados ao projeto. Por outro lado, os gastos de recursos financeiros e tempo despendido para fazer ajustes posteriores geralmente são bem maiores, e os riscos, talvez, nem compensem.

Por essa razão, a aplicação desse processo de avaliação da maturidade da tecnologia, com base na EAP, ao patamar do sistema e, em seguida, aos níveis mais baixos dos subsistemas e dos componentes, permite aos engenheiros identificar aqueles elementos críticos que precisam ser desenvolvidos antes de serem inseridos/integrados ao produto (BILBRO, 2001b, 2006, 2007b, 2007c; NASA 2007).

8. Após a identificação dos níveis de prontidão e dos elementos críticos da tecnologia, realizar uma avaliação da AD², com o fim de determinar o que é necessário fazer para que a tecnologia avance e alcance o nível de TRL desejado. Essa avaliação é feita em conjunto com a EAP e é usada como base para o roteiro do desenvolvimento da tecnologia, bem como para determinar os custos do projeto (NASA, 2008, p. 41).

Logo, para que uma tecnologia evolua a um nível mais alto de prontidão, ou seja, suba na escala TRLs, é necessário fazer uma avaliação de suas capacidades com relação à concepção, análise, fabricação e teste. Essa avaliação adicional fornece as informações necessárias para estimar custos, programar planos e realizar avaliações preliminares dos riscos. Na avaliação subsequente, as informações colhidas são usadas para construir o TDP com a intenção de identificar caminhos alternativos, posições de recuo e opções de desempenho. A AD² também é vital para a preparação de marcos e métricas a serem utilizados no gerenciamento do valor agregado (GVA) (NASA, 2007; BILBRO, 2008a, 2008b).

9. Preparar um roteiro que aborde custos, cronograma de tempo e riscos associados ao avanço de cada elemento até o ponto necessário para atender aos requisitos de forma conveniente e oportuna. Identificar caminhos alternativos, KDPs, posições de recuperação de falhas e marcos quantificáveis previstos em cronogramas de tempo compatíveis. O roteiro deve descrever a estratégia geral para progredir em direção aos parâmetros-chave de desempenho (*key performance parameters – KPPs*) e mostrar como os marcos de desempenho intercalares serão verificados por meio de testes (NASA, 2008, p. 41-42).

Após a formulação do conceito e a identificação inicial das tecnologias críticas, o processo de avaliação da maturidade de tecnologia segue concomitantemente com a elaboração de estudos detalhados de arquitetura. A finalidade desses estudos de arquitetura é a de refinar a concepção do item-fim do sistema para satisfazer os requisitos científicos, de ponta a ponta, da missão. É imperativo que haja um relacionamento contínuo entre o pessoal responsável pelos estudos de arquitetura e os engenheiros que desenvolvem a tecnologia.

Por um lado, os estudos de arquitetura devem incorporar os resultados do amadurecimento da tecnologia, o planejamento para caminhos alternativos e a identificação de novas áreas necessárias para o desenvolvimento. Por outro lado, cabe ao processo de maturação da tecnologia identificar os requisitos que não são viáveis e as rotas de desenvolvimento que não são frutíferas. Assim, enquanto os engenheiros transmitem os dados sobre o amadurecimento da tecnologia, recebem, em tempo hábil, o retorno das informações relativas às mudanças nos requisitos realizadas pelos estudos de arquitetura (NASA, 2007).

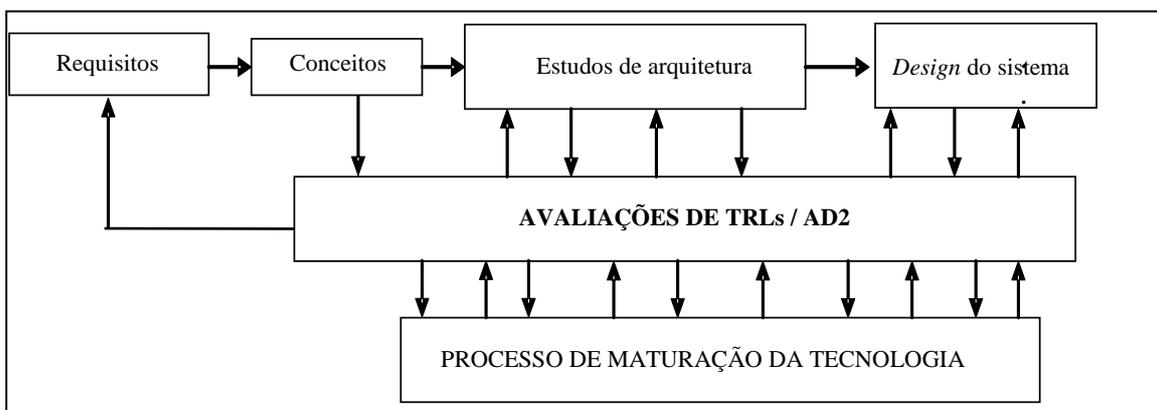


Figura 13 - Modelo de interação entre os estudos da arquitetura e as avaliações da tecnologia no processo de maturação.

Fonte: Figura traduzida e adaptada (NASA, 2007).

Bilbro (2007a, 2007c) alerta para o fato de que os níveis mais elevados de prontidão só podem ser alcançados quando avaliados com relação ao projeto no qual a tecnologia está sendo incorporada. O então diretor do MSFC reconhece que o registro da evolução da tecnologia pode até ser feito para um nível mais alto de prontidão apenas com a definição de um conjunto de requisitos operacionais genéricos e arquiteturas, que poderão apresentar inúmeras formas de potenciais aplicações finais. Porém, ele alerta que, na avaliação final, a prontidão da tecnologia é definida com base em uma arquitetura específica e um ambiente operacional estabelecido para determinado projeto.

Em suma, a avaliação da maturidade nos níveis mais elevados de TRLs é realizada levando em consideração o projeto para o qual a tecnologia está sendo desenvolvida. Não se pode, portanto, atribuir um nível de TRL apenas com base na evolução da tecnologia.

Nesse contexto, cumpre observar que, embora sejam níveis intermediários, a avaliação da prontidão nos TRL 4 e TRL 5 deve considerar o estado da arte em que se encontra a tecnologia. Como bem explica a norma da ABNT (2015), no nível TRL 4, assim como no TRL 3:

[...] os requisitos de desempenho do elemento são gerais e definidos de maneira abrangente. Eles são consistentes com quaisquer potenciais aplicações em sistemas. [No TRL 4] Os requisitos de desempenho funcionais do elemento são estabelecidos e os objetivos estão definidos com relação ao atual estado da arte (ABNT, 2015, p. 7).

No tocante ao TRL 5, a norma de padronização observa que, nesse nível, requisitos incompletos são aceitos, “na medida em que isto não afeta a identificação das funções críticas do elemento e o plano de verificação associado” (ABNT, 2015, p. 8).

Como mencionamos acima no passo 2, mesmo que a validação da tecnologia seja de baixa ou mesmo média fidelidade, os testes de desempenho do elemento nos níveis TRL 4 e TRL 5 requerem um conhecimento adequado do ambiente operacional final. Se as previsões de desempenho do elemento não estiverem bem definidas com relação ao ambiente operacional final, a tecnologia não pode ser avaliada além do nível TRL 3, mesmo que os requisitos finais para potenciais aplicações estejam identificados.

Em outras palavras, sem um conhecimento do sistema, especialmente com relação à definição de sua arquitetura e do ambiente operacional, a maturidade da tecnologia não pode ser avaliada além do nível TRL 4.

Ora, para atravessarmos a fronteira da pesquisa científica (TRL 1 a TRL 3) para a fronteira “fuzzy” do desenvolvimento da tecnologia, com a realização de pesquisas avançadas, é necessário ter um conhecimento adequado do sistema que se pretende construir, com a definição preliminar de sua arquitetura e dos requisitos para sua aplicação, bem como a identificação do ambiente no qual se pretende operá-lo.

Podemos, portanto, concluir que, sem um domínio preliminar do sistema e do ambiente operacional, o nível de prontidão não consegue avançar além do TRL 4. Com isso, as pesquisas avançadas saem do campo do conhecimento “sabemos que não sabemos” para o “nem sabemos que não sabemos”. Nesse caso, as incertezas vão além das “imprevisíveis”, e os engenheiros precisam estar prontos para lidar com o “caos”.

Isso ocorre porque as pesquisas avançadas só podem contribuir para o amadurecimento da tecnologia nos níveis intermediários (TRL 4 a TRL 6) se o PPP estiver bem delineado, com a definição de sua estrutura básica, além da apresentação dos resultados de estudos analíticos e/ou experimentais documentados, validando as previsões dos KPPs. Sem as definições preliminares da arquitetura do sistema e dos requisitos para a sua aplicação, bem como a identificação do ambiente operacional final, os engenheiros devem estar preparados para, no médio e longo prazos, lidar com contingências que não foram planejadas. Em vez de avançar nas pesquisas para o desenvolvimento da tecnologia, os engenheiros podem se ver obrigados a alterar constantemente a estrutura do projeto e a buscar novas abordagens. Gerenciar o caos pode exigir completa redefinição do projeto, o que geralmente acarreta aumento de custos, cronograma de tempo e riscos.

10. O projeto deverá ser avaliado anualmente por meio da avaliação agregada das tecnologias individuais e de seus progressos em direção ao objetivo do nível de TRL estabelecido (NASA, 2008, p. 42, tradução nossa).

Como mencionamos acima, o amadurecimento é medido em comparação ao TRL fixado na avaliação inicial, que forneceu a linha de base. Assim, a evolução da tecnologia é rastreada a partir do estado da arte em que ela se encontrava, e as avaliações subsequentes vão marcando os níveis de maturação alcançados de acordo com o método TRLs. A avaliação final da maturidade da tecnologia serve de suporte para o Trar, a ser elaborado no fim do projeto pelo grupo de especialistas independentes, nomeado pelo gerente do projeto. O Trar deverá validar o estado de

desenvolvimento da tecnologia e o nível de TRL em que ela se encontra (NASA, 2007, 2008).

Um passo decisivo na realização de uma avaliação diz respeito à escolha dos membros da equipe para mensurar o nível de amadurecimento da tecnologia em questão. Para essa etapa, é extremamente importante ter uma equipe de avaliação bem equilibrada e experiente. Os membros da equipe não precisam ser necessariamente especialistas na disciplina, mas precisam entender o que foi feito e em que condições, com relação a sistemas, subsistemas e componentes, além de compreender como a tecnologia se relaciona com o que está sendo avaliado. Assim, o principal especialista no assunto pode ser um engenheiro de sistemas ou um usuário capaz de perceber as aplicações do atual estado da arte da tecnologia (NASA, 2007, 2008).

6.3 Limitações do método TRLs

Nos últimos anos, agências governamentais dos Estados Unidos, assim como universidades, institutos e empresas de tecnologia que com elas contratam, têm utilizado a escala TRLs com pequenas variações para satisfazer interesses específicos no desenvolvimento de tecnologias. Essas variações refletem as críticas que o método TRLs vem recebendo por parte de pesquisadores, engenheiros e gerentes de projetos, que apontam algumas restrições quanto a sua aplicação.

Alguns críticos argumentam que o método da Nasa não abrange os riscos que envolvem o desenvolvimento de sistemas e propõem a aplicação de uma abordagem holística com os TRLs. Outros afirmam que a avaliação da maturidade, mediante a aplicação da escala TRLs, não é o único fator determinante da evolução da tecnologia ao longo do ciclo de vida de um projeto de P&D. Para eles, fatores como riscos, custos, cronograma de tempo, capacidade de fabricação e integração também são fundamentais para apoiar as decisões sobre a transição da tecnologia. Com isso, pesquisadores criaram, ao longo desses anos, métodos e processos que podem fornecer informações complementares sobre o amadurecimento da tecnologia durante o ciclo de vida do desenvolvimento de sistemas, com o fim de assegurar uma contínua gestão dos riscos e melhoria no apoio à tomada de decisão (GRAETTINGER et al., 2002; HICKS et al., 2009; LEE; CHANG; CHIEN, 2011; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003; NOLTE, 2008; RAMIREZ-MARQUEZ; SAUSER, 2009; SAUSER et al., 2006; SAUSER et al., 2008; SAUSER et al., 2009; SMITH, 2005; VALERDI; KOHL, 2004).

Nolte (2008, p. 77-91) observou que, desde a concepção do método de avaliação da maturidade de tecnologia pela Nasa, mediante a escala TRLs, no fim da década de 1980, houve o que ele chamou de “uma proliferação de níveis de prontidão”, usados para medir o progresso de projetos/programas. Esses novos métodos são, geralmente, outras métricas de níveis de prontidão ou corolários dos TRLs, criados para atender a necessidades específicas de projetos/programas de tecnologia, seja para adaptar os TRLs a novas finalidades ou, ainda, para complementar a avaliação da maturidade.

O primeiro desses estudos foi exposto pelo próprio Mankins, autor do “Relatório branco” da Nasa de 1995, que considerou a escala TRLs limitada por não fornecer informações acerca das incertezas existentes ao se tentar avançar a maturação da tecnologia em um projeto de P&D. Em 2002, o relator dos nove níveis de prontidão de tecnologia propôs, então, o uso de métrica adicional, que ele denominou degrau de dificuldade de pesquisa e desenvolvimento (*research and development degree of difficulty – R&D³*), como complemento à abordagem TRLs. Em adição, propôs o índice de tecnologia integrada (*integrated technology index – ITI*), uma métrica quantitativa para calcular a maturidade cumulativa a ser alcançada por cada tecnologia, ampliada pela dificuldade dessa maturação e a importância projetada da tecnologia para o sistema no qual ela deveria ser usada. Estabeleceu assim a metodologia conhecida como análise de tecnologia integrada (*integrated technology analysis methodology – Itam*) (MANKINS, 1995, 2002, 2009a).

Em 2009, Mankins aprimorou sua abordagem ao propor um sistema que combinava o conceito de TRLs e uma matriz de risco. Esse sistema combinado se propunha a calcular o avanço de uma tecnologia para o nível de prontidão desejado em uma missão, o quanto de avanço seria requerido e a dificuldade para avançar cada nível de TRL requerido. Com isso, apresentou uma nova abordagem, a avaliação de prontidão de tecnologia e risco (*technology readiness and risk assessment – TRRA*) (MANKINS, 2002, 2009a).

Valerdi e Kohl (2004, p. 1-5) afirmaram que o método TRLs não capta de forma eficiente os riscos que envolvem o desenvolvimento de uma tecnologia. Eles propuseram uma abordagem holística dos riscos tecnológicos com os TRLs, partindo da premissa de que o método TRLs deveria considerar fatores que introduzem novos riscos à medida que a tecnologia atinge níveis altos de prontidão. Segundo os autores, esses fatores incluem a obsolescência e a insurgência de uma nova e melhor tecnologia que

apresente capacidade equivalentes a existente,¹⁰ como ocorreu com a transição do disco flexível (*floppy disc*) para o disco compacto (*compact disc* – CD) (VALERDI; KOHL, 2004, p. 7).

Smith (2004, p. 7-9) analisou as limitações dos TRLs com relação à avaliação da maturidade da tecnologia de produtos baseados em *software*, enumerando, entre outras, algumas características: indefinição ou confusão de vários componentes de prontidão em um único nível; falta de mecanismo interno para lidar com questões como a situação crítica de uma tecnologia com relação ao sistema como um todo; envelhecimento de item não desenvolvvente (*non-developmental item* – NDI); e diversas análises dos colaboradores sobre a experiência da maturidade em diferentes fases do ciclo de vida de desenvolvimento e/ou aquisição de tecnologia.

Segundo Smith, essas características limitavam o uso dos TRLs para avaliar a maturidade da tecnologia de *softwares*, especialmente em NDI de produtos para *softwares*. O autor desenvolveu, então, nova abordagem para complementar os TRLs. Embora teórica, sua abordagem pretende permitir que os critérios de avaliação de maturidade sejam adaptados às particularidades de qualquer desenvolvimento do sistema, incluindo julgamentos sobre aquisição e riscos de desenvolvimento (SMITH, 2004, p. 11-25).

No esforço de expandir o método TRLs para criar uma plataforma que pudesse atender a suas especificidades no desenvolvimento de sistemas de aquisição de defesa, o DoD elaborou os níveis de prontidão de manufatura (*manufacturing readiness levels* – MRLs), para avaliar sistemas de engenharia, processos de *design* e maturidade de tecnologias associados ao processo de fabricação de armas (UNITED STATES, 2015b).

De fato, a métrica MRLs foi desenvolvida em 2005, pelo DoD, para avaliar os níveis de prontidão do processo de manufatura durante o ciclo de vida dos projeto de aquisição de sistemas de defesa. Esse método compreende uma escala de dez níveis usada para definir os níveis de prontidão de fabricação de um produto, identificar lacunas no processo de produção e nos riscos a ele associados. A escala MRLs de dez níveis é correlacionada a escala TRLs de nove níveis. O último nível, MRL 10, mede aspectos de práticas e melhorias contínuas para sistemas que se encontram na fase de produção. Assim, no DoD, os métodos TRLs e MRLs são aplicados como medidas-

¹⁰*The leap frogging effect.*

chave, que se complementam para definir os riscos associados à transição de uma tecnologia para o sistema a ser produzido (UNITED STATES, 2015b, p. 10-14).

Cornford e Sarsfield (2004), citados por Azizian, Sarkani e Mazzuchi (2009), consideram que a abordagem TRLs tem como foco um elemento particular da tecnologia, e não aborda a integração de sistemas de sistemas. Para eles, os TRLs não agregam bem ferramentas de modelagem de custos e riscos. Azizian, Sarkani e Mazzuchi (2009) acrescentam à visão desses autores o entendimento de que os TRLs não dão uma imagem completa dos riscos de se integrar a tecnologia a um sistema.

Preocupado com a inserção de tecnologias em sistemas, o Ministério da Defesa do Reino Unido (*United Kingdom Minister of Defense – UK MOD*) também desenvolveu um método de avaliação dos níveis de prontidão de sistemas, conhecido de forma abreviada como UK MOD SRL. Esse método consiste em uma métrica de inserção de tecnologia, que combina o método dos TRLs com o de níveis de prontidão de sistemas (*system readiness levels – SRLs*) e o de níveis de prontidão de integração (*integration readiness levels – IRLs*) (AZIZIAN, SARKANI; MAZZUCHI, 2009).

Nesse contexto, Sauser et al. (2006, p. 5-7, 2008, p. 677-679, 2009, p. 8-12) e Ramirez-Marquez e Sauser (2009, p. 535) sustentam que a integração de tecnologia como parte do ciclo de vida de sistemas pede uma ferramenta de avaliação de natureza quantitativa. A intenção é determinar se diversos componentes separados com seus respectivos níveis de prontidão de tecnologia podem ser integrados a um sistema complexo, com risco razoavelmente baixo, para realizar função ou missão requerida com um nível determinado de desempenho. Enquanto os TRLs proporcionam uma métrica para descrever o conhecimento de tecnologias de componentes, esses autores argumentam que é necessário uma métrica para descrever o conhecimento da arquitetura de sistemas, por exemplo, o conhecimento sobre como os componentes são integrados (SAUSER et al., 2006, 2008, 2009; RAMIREZ-MARQUEZ; SAUSER, 2009).

Muitos esforços são feitos para desenvolver métricas que possam não só serem aceitas por todas as partes interessadas, mas também possam avaliar a prontidão de integração de tecnologias e, ainda, serem usadas com os TRLs para determinar efetivamente a prontidão de sistemas. Na busca dessa plataforma comum, o Instituto de Tecnologia Stevens (*Stevens Institute of Technology*) desenvolveu a métrica denominada níveis de prontidão de integração (IRLs), uma escala de nove níveis que

descreve o processo de prontidão de integração de uma tecnologia em desenvolvimento com outra, também em desenvolvimento ou já madura (RAMIREZ-MARQUEZ; SAUSER, 2009).

Com efeito, a escala IRLs foi concebida para promover análise sistemática da interface de interações compatíveis de diversas tecnologias, bem como comparação consistente da prontidão entre múltiplos pontos de integração de um sistema. Assim como os TRLs têm sido usados para avaliar riscos associados ao desenvolvimento de tecnologias, professores e pesquisadores do Instituto de Tecnologia Stevens argumentam que os IRLs foram projetados para avaliar riscos associados a integração dessas tecnologias ao sistema ou produto (SAUSER et al., 2009). Entretanto, assim como os TRLs, os IRLs não são suficientes para identificar a causa dos riscos associados ao projeto.

Ramirez-Marquez e Sauser (2009, p. 535) reconhecem que as duas métricas, TRLs e IRLs, não são suficientes para avaliar o desenvolvimento do sistema como um todo quando aplicadas isoladamente e fora do contexto do desenvolvimento do sistema. Para solucionar essa limitação, desenvolveram uma métrica quantitativa também denominada níveis de prontidão de sistemas (SRLs) (SAUSER et al., 2008, p. 680-689). Posteriormente, Ramirez-Marquez e Sauser (2009) criam o Modelo de otimização dos níveis de prontidão de sistemas e solução algorítmica (*System readiness level optimization model and solution algorithm* – SRLmax), uma versão otimizada de sua métrica SRLs, baseada na alocação de recursos.

Em suma, os SRLs compreendem a combinação dos TRLs com os IRLs de cada um dos elementos que compõem o sistema. O cálculo SRLs é considerado como matriz normalizada de comparações em termos de pares de TRLs e IRLs. Como um sistema é constituído de várias tecnologias conectadas umas às outras, essa rede de tecnologias e suas interfaces formam a matriz SRLs, como uma função de TRLs e IRLs (SAUSER et al., 2006, 2008, 2009).

A vantagem dessa abordagem é a de reconhecer que a integração desempenha papel importante na conclusão do projeto/programa, e de oferecer a oportunidade de definir a prontidão de um sistema em um único número. Uma das desvantagens apontadas está no fato de que os SRLs requerem o uso de IRLs, ainda considerados como ferramenta precária para resultar em uma aplicação prática. Essa abordagem prevê apenas o *status* das tecnologias, mas não fornece nenhum meio de quantificar o

que resta a ser feito para o desenvolvimento do sistema como um todo (SAUSER et al., 2006, 2008, 2009).

Igualmente, o SRLmax é uma versão aprimorada dos SRLs. Trata-se, portanto, de um modelo matemático destinado a otimizar o índice de SRLs de sistemas que estão sob contenção de recursos. O objetivo do SRLmax é encontrar a melhor solução que forneça o mais alto índice de prontidão de sistema SRL possível, levando em conta recursos disponíveis, especialmente os de custo, e cronograma de tempo. Ele combina uma técnica de avaliação subjetiva para determinar a maturidade de um sistema com um método quantitativo de alocação de recursos focado na melhoria do desenvolvimento de sistemas (RAMIREZ-MARQUEZ; SAUSER, 2009).

6.4 Benefícios do uso dos TRLs

Esses estudos são parte dos esforços em pesquisa para definir riscos e custos associados ao desenvolvimento de tecnologia. Embora tenham ajudado a expandir a aplicação dos TRLs, os métodos propostos ainda não conseguiram abordar, de forma efetiva, todas as questões relacionadas à integração de tecnologias ou sua progressão. As limitações apontadas por alguns críticos não foram suficientes para inibir o uso da escala TRLs. Esse método é, portanto, amplamente utilizado como sistema pragmático que auxilia a avaliação da maturidade de tecnologia, porque permite adaptações para atender a especificidades das organizações.

Bilbro (2006, 2007a, 2007c) rebate as críticas, ressaltando que o foco da escala TRLs não é a tecnologia, mas sim o sistema ao qual ela vai ser incorporada. Segundo o autor, os críticos parecem esquecer e, muitas vezes, deixam de reconhecer que o método TRLs foi desenvolvido para reduzir os riscos de introduzir tecnologia imatura em sistemas que seriam lançados no espaço.

Os principais fatores que levaram à criação da escala TRLs foram aumento de custos, perda de prazos previstos em cronogramas de tempo e, até mesmo, falhas de sistemas em razão do uso de tecnologias imaturas. No entanto, ao longo dos anos, a escala TRLs passou a ser vista como ferramenta voltada para os desenvolvedores de tecnologia, quando, em verdade, foi criada como instrumento para auxiliar o desenvolvedor de sistemas e, portanto, para ser utilizada na órbita da competência da engenharia de sistemas. Para ele, o engenheiro de sistemas deve ter uma visão da

extensão do impacto do desenvolvimento da tecnologia, maximizando benefícios e minimizando efeitos adversos para o projeto (BILBRO, 2001b, 2006, 2007a, 2008).

Nessa linha de raciocínio, o então diretor assistente para Tecnologia e Tecnólogo chefe do MSFC argumenta que os TRLs não têm nenhum significado para um desenvolvedor, exceto no que se refere a sua capacidade de obter o aceite de uma tecnologia para um projeto de P&D. Ele ressalta também que a escala TRLs não foi engendrada para a tecnologia que se pretende desenvolver. Ao contrário do que afirmam alguns críticos, os TRLs miram o sistema ao qual a tecnologia vai ser incorporada (BILBRO, 2001b, 2007a, 2008a; BILBRO; YANG, 2009).

De fato, os dois últimos níveis da escala – TRL 8 e TRL 9 – dizem respeito à avaliação de um sistema real e não apenas de uma tecnologia. Logo, a avaliação da maturidade de tecnologia por meio dos TRLs se inicia com os princípios de base observados e relatados (TRL 1) e vai escalando, nível a nível, até alcançar o nível desejado pelo projeto, ou o nível mais alto, atualmente o TRL 9, quando um sistema real é “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida.

Com relação à gestão dos riscos, Nolte (2003, p. 2) ressalta que, para Moorehouse (2001, apud NOLTE, 2003), os TRLs servem como um indicador de riscos na área de custos e, por isso, podem ajudar a diminuir incertezas no desenvolvimento de tecnologias. Ao saber o nível de prontidão em que se encontra uma tecnologia e o nível requerido pelo projeto, os gerentes podem traçar um plano de ação descrevendo as atividades que faltam ser realizadas para atingir o desenvolvimento desejado dessa tecnologia. Porém, ele conclui que os TRLs apresentam uma visão “unidimensional” da prontidão da tecnologia (NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003; AZIZIAN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009).

Nesse quadro, Nolte desenvolveu, em 2002, a primeira calculadora TRLs para o laboratório AFRL. Essa calculadora é, em verdade, uma aplicação da planilha de Excel da Microsoft[®] que permite ao usuário responder a uma série de perguntas sobre a tecnologia do projeto. Ela processa os dados e exibe como resultado um nível de TRL com base nas respostas alimentadas na planilha. Ao aplicar o conceito TRLs, a calculadora da Força Aérea norte-americana oferece uma fotografia instantânea do nível de prontidão da tecnologia em um determinado ponto no tempo (GRAETTINGER et al., 2002; NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003; NOLTE, 2008).

Acompanhando esse entendimento de que a escala TRLs confere uma visão unidimensional da prontidão de tecnologia, Graettinger et al. (2002) reconheceram que essa abordagem auxilia o processo de tomada de decisão no desenvolvimento de uma tecnologia, mas a consideraram apenas como um dos diversos fatores críticos desse processo. Eles estimaram em sua pesquisa que a escala TRLs informa aproximadamente 30% dos fatores críticos que os gerentes de projetos precisam saber ao tomar decisões no processo de seleção da tecnologia e, portanto, não deve ser usada como critério único na avaliação da tecnologia.

Em seu estudo para o Cecom, Graettinger et al. (2002, p. 6-8) observaram que os TRLs são um método útil no processo de tomada de decisão para a seleção de novas tecnologias a serem desenvolvidas e amadurecidas dentro do ambiente dos departamentos de Objetivo de Ciência e Tecnologia (*Science and Technology Objective* – STO) e de Demonstração de Tecnologias Avançadas (*Advanced Technology Demonstration* – ATD). De suas entrevistas com oficiais do exército, eles verificaram que o uso dos TRLs pela comunidade de P&D incentiva o pessoal do ATD a selecionar tecnologias já existentes, desenvolvidas por universidade e laboratórios de pesquisa. Embora imaturas, eles preferem amadurecer essas tecnologias do que começar a desenvolver, eles próprios, novas tecnologias desde o início, com observação e relato de princípios básicos (TRL 1). Assim, concluíram que o uso dos TRLs é “fortemente encorajado” pelo exército e pelos altos funcionários do Ministério da Defesa, e tem sido vantajoso no processo de tomada de decisão de seleção de tecnologia do STO e do ATD (GRAETTINGER et al., 2002, p. 6-7).

Não resta dúvida que os TRLs foram idealizados para resolver questões relacionadas à imaturidade de tecnologias que impediam previsão realista de custos e riscos associados, bem como do cronograma de tempo de projetos. Foi exatamente na era pós-Apollo, na qual os engenheiros da Nasa enfrentavam cortes no orçamento e, conseqüentemente, redução significativa de programas e missões espaciais, que o governo norte-americano promoveu uma revisão de sua Política Nacional Espacial. Porém, como explicamos no capítulo 3 deste estudo, a raiz dos problemas estava na falta de comunicação entre os gerentes dos programas de desenvolvimento de tecnologia e os de desenvolvimento de sistemas, além do excesso de burocracia administrativa que permeava os departamentos de Ciência, Engenharia e Gestão de Programas e Projetos da Nasa, e destes com os órgãos governamentais. Nesse contexto,

nasceu a primeira escala TRLs, como parte dos esforços dos engenheiros da Nasa em criar melhores abordagens de gestão dos programas e projetos de pesquisa e tecnologia espaciais.

O método TRLs foi, portanto, concebido para auxiliar a avaliação da maturidade de tecnologias (e de sistemas) ao longo de todo o ciclo de vida do projeto. É um método que permeia todo o processo de desenvolvimento de tecnologia durante todo o ciclo de vida do projeto. A avaliação inicial da maturidade de tecnologia deve ser elaborada desde o nascimento do projeto, ou melhor, quando da transição da Pré-fase A para a Fase A de seu ciclo de vida, porque fornece ao desenvolvedor de tecnologia uma linha de base do estado da arte em que se encontra a tecnologia. Tanto a avaliação inicial da maturidade de tecnologia como as demais promovidas ao longo do ciclo de vida do projeto, com as AD², permitem identificar o que é preciso ser feito para que a tecnologia avance ao ponto de poder ser incorporada a um sistema, dentro das restrições de custos, cronograma de tempo e desempenho estabelecidas pelo projeto.

A métrica AD² foi concebida para ser aplicada com a TMA, que identifica o nível de TRL de uma tecnologia e/ou sistema. Esse método é focado em responder a questões relativas a custos, cronograma de tempo e riscos de vários elementos (sistemas, subsistemas, componentes) que se encontram abaixo do nível desejado de prontidão avaliado em uma TMA durante o ciclo de vida de um projeto de P&D. A vantagem desse método está no fato de ser de fácil aplicação e abranger toda a estrutura analítica do projeto, desde o nível de sistemas de sistemas, descendo até o nível de componente. Porém, esse processo depende do tipo de perguntas a serem feitas que, por isso, precisam ser continuamente refinadas (BILBRO, 2008a, 2008b; BILBRO; YANG, 2009).

Bilbro (2006, 2007) afirma que os TRLs são uma métrica que descreve a prontidão de dada tecnologia definida pelo que foi feito e em que condições em determinado espaço de tempo no ciclo de vida de um projeto. Os TRLs são vistos como o espelho do vidro retrovisor, porque mostram onde estava a tecnologia em um dado ponto no tempo. Todavia, o diretor assistente de Tecnologia e Tecnólogo Chefe do MSFC explica que os TRLs são apenas parte da equação, porque ajudam a fixar uma linha de base da maturidade da tecnologia para o projeto. Para ele, a questão fundamental está em saber o que é preciso fazer, em termos de custos, riscos e cronograma de tempo, para mover a tecnologia do nível em que ela se encontra para o

nível que precisa alcançar na escala TRLs a fim de ser considerada madura e incorporada a um sistema com sucesso. A resposta, segundo Bilbro (2007, 2008b), está na AD². Esse método leva em consideração, entre outros, aspectos organizacionais, como a habilidade da organização de reproduzir a tecnologia existente, MRL, IRL etc. (BILBRO, 2006, 2007a, 2008a, 2008b; BILBRO; YANG, 2009).

A Nasa desenvolveu com o AFRL uma calculadora (*NASA-AFRL TRL Calculator*). Essa ferramenta foi projetada especificamente para realizar avaliações da maturidade de tecnologia com base na EAP, e abrange os nove níveis da escala TRLs para as categorias de *hardware*, *software* e de fabricação. Essa calculadora é usada como ferramenta de abordagem que auxilia a avaliação da maturidade de tecnologia e, com isso, se tornou instrumento de padronização para a avaliação global de sistemas em projetos de desenvolvimento de tecnologia (BILBRO, 2008a, 2008b; BILBRO; YANG, 2009).

Os TRLs permitem a avaliação da maturidade de cada sistema, subsistema e componente, identificados na estrutura analítica do projeto, e essa avaliação pode ser repetida infinitamente, de acordo com as necessidades, o que ajuda a planejar e explicar o desenvolvimento de tecnologias ao longo do ciclo de vida do projeto. Logo, o verdadeiro significado dos TRLs e, conseqüentemente, da AD², está direcionado ao usuário final do projeto/programa. Esses métodos de avaliação, quando utilizados em conjunto, descrevem a tecnologia com relação a sistemas, subsistemas e componentes individuais. O “Manual de engenharia de sistemas da Nasa” (2007, p. 296, tradução nossa) frisa que, nos dias de hoje, “é impossível entender a magnitude e o escopo de um programa de desenvolvimento sem ter compreensão clara da linha de base da maturidade de tecnologia de todos os elementos do sistema”.¹¹ Para a Nasa, estabelecer o TRL é o primeiro passo vital para o sucesso de um projeto/programa (NASA, 2007).

Fica, portanto, evidente que, como método de avaliação, os TRLs envolvem uma série de partes interessadas no processo de maturação da tecnologia ao longo do ciclo de vida do projeto. Os envolvidos são desde gerentes, pesquisadores, engenheiros e, entre eles, desenvolvedores de tecnologia, desenvolvedores de sistemas, executivos e autoridades responsáveis pela tomada de decisões, até chegar ao usuário final do projeto

¹¹*It is impossible to understand the magnitude and scope of a development program without having a clear understanding of the baseline technological maturity of all elements of the system.*

e/ou programa, que busca o amadurecimento de tecnologias para que possam ser incorporadas a sistemas reais por meio de operações em missões bem-sucedidas.

Banke (2010) ressalta que a Nasa vai continuar a usar o método TRLs, especialmente com o crescimento de seu novo Programa de Pesquisa de Sistemas Integrados, o qual abre uma janela de oportunidades para que os projetos de P&D avancem na escala TRLs da pesquisa básica para a pesquisa de sistemas. Essa questão é de grande relevância, à medida que os sistemas estão se tornando cada vez mais dependentes do desenvolvimento de múltiplas tecnologias.

Na Nasa, não existe regra fixa para o desenvolvimento de tecnologia na área de aeronáutica. A evolução de pesquisa básica para pesquisa de sistemas geralmente ocorre nos níveis TRL 3 ou TRL 4. Ao atingir esses níveis na escala, a tecnologia já ultrapassou a fase de estudos em artigos científicos, e os componentes estão na fase de pesquisa aplicada e desenvolvimento. Isso significa dizer que a tecnologia está pronta para ser integrada a um sistema maior para, então, ser testada posteriormente em ambientes mais realistas (BANKE, 2010).

6.5 Nível TRL 10

A ideia de se adicionar um nível à escala TRLs vem sendo discutida há algum tempo. Segundo os defensores do TRL 10, esse novo nível complementaria a avaliação da maturidade de tecnologia. O TRL 10 traria a noção de operações comprovadas, no sentido da tecnologia vir a receber uma certificação, quando aplicável, via instrumentos de padronização e entidades reconhecidas. Caso não fosse possível, a avaliação da maturidade de tecnologia para o nível TRL 10 seria feita por especialistas capazes de comprovar seu uso sem incidentes (ou com níveis de incidência dentro de limite aceitável) por um período de tempo prolongado. Em outras palavras, o novo nível TRL 10 poderá ser criado para identificar as taxas de insucesso da tecnologia e demonstrar que as condições de falhas técnicas e suas causas são compreendidas (ROBINSON et al., 2009; STRAUB, 2015).

Foi há 16 anos, ou seja, em 2000, que Brown e Mccleskey (2000 apud STRAUB, 2015, p. 312-313) propuseram, pela primeira vez, a adição do décimo nível à escala TRL para descrever a “prontidão certificada de voo”, semelhante à certificação de transporte aéreo comercial fornecida pela Administração Federal de Aviação norte-

americana (*Federal Aviation Administration – FAA*), para aeroportos e companhias aéreas. Eles pretendiam denotar a diferença entre uma única utilização da tecnologia em funcionamento (TRL 9) e o que seria a certificação da tecnologia mediante sua operação prolongada (TRL 10). Todavia, Brown e McCleskey não aprofundaram a ideia proposta, deixando de apresentar estudos detalhados sobre a definição e a aplicação do TRL 10.

Somente em 2009, a ideia de um nível TRL 10 foi reavivada em um artigo apresentado por Robinson et al. (2009) na 45ª Conferência AIAA/ASME/SAE/ASEE de Propulsão Conjunta. Eles apresentaram proposta muito semelhante a de Brown e McCleskey, na qual descreviam um nível de prontidão de tecnologia para o “transporte espacial geração 2 e além”. Para os autores (ROBINSON *et al.*, 2009, p. 5), o TRL 10 deveria compreender “a certificação do sistema como um todo, mediante critérios rigorosos para operações bem-sucedidas, repetidas sem perda da integridade do sistema”. Eles explicam que a expressão “repetidas sem perda da integridade do sistema” refere-se à habilidade que um determinado veículo de transporte espacial precisa ter para manter a integridade funcional enquanto o operador conduz processos de solo (ROBINSON *et al.*, 2009).

Em 2015, Straub (2015, p. 314-317) voltou ao tema em artigo no qual reforça a necessidade de se aumentar em um nível a escala da Nasa. Ele justifica a necessidade do TRL 10 como meio de apoiar operações espaciais comerciais, por exemplo, as planejadas por empresas como Space X e Virgin Galactic, bem como alinhar sistemas aos TRLs, para operações no ar e no espaço, que incorporem novas tecnologias com sistemas de comando autônomo e de teletransporte para *drones*. Além disso, o autor considera relevante a adição do TRL 10 para incentivar o uso de partes de ativos e produtos para aeronaves entre agências governamentais e indústrias do setor, além de promover melhores práticas para atividades espaciais futuras.

Desse modo, Straub (2015) propõe a inclusão do TRL 10 como último nível de avaliação da prontidão de tecnologia em diferentes sistemas, tais como os definidos por Mankins (1995) para a escala TRLs, e descritos para *hardware* e *software*, em complemento no Apêndice E da NPR 7123.1B da Nasa (2013), e para a definição no formato do manual da ESA (2008). O autor também propõe questões para complementar o processo de avaliação da prontidão da tecnologia, conforme

apresentado pela Nasa no Apêndice G de seu “Manual de engenharia de sistemas” (NASA, 2007).

Por conseguinte, Straub (2015) sugere como critério de saída do TRL 10 a apresentação de evidências que demonstrem o uso documentado da tecnologia sem incidentes por um período de tempo prolongado, bem como a documentação da certificação, dos resultados das taxas de insucesso, das condições de falhas conhecidas e da avaliação de aceitabilidade dos requisitos de solução de problemas e/ou de reparações. No fim, conclui que o TRL 10 deve ser subdividido em dois subníveis para auxiliar a avaliação de tecnologias e sistemas nesse último nível da escala da Nasa (STRAUB, 2015).

7 OS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Uma vez concluída a revisão literária sobre os TRLs, iniciaremos neste capítulo os procedimentos metodológicos adotados para o estudo do projeto MagLev-Cobra. Assim, começaremos com o plano de desenvolvimento da pesquisa de campo, com o fim de extrair sentido dos dados coletados e obter uma maior compreensão do processo de desenvolvimento da tecnologia SML. O plano prevê a coleta, organização, seleção, leitura e categorização das informações obtidas sobre o projeto MagLev-Cobra. A validação e a verificação dos dados são realizadas mediante consulta à equipe dos engenheiros do Lasup. Os TRLs foram utilizados como parâmetros para traçar a trajetória evolutiva da tecnologia. No fim, traçaremos duas linhas do tempo: uma para delinear os blocos de etapas que assinalam o amadurecimento da tecnologia ao longo do curso do projeto MagLev-Cobra; outra para situar o projeto MagLev-Cobra no contexto da evolução do método TRLs. Neste capítulo, o foco são os elementos essenciais que caracterizam a estratégia de gestão do projeto MagLev-Cobra e influenciam a tomada de decisão no processo de desenvolvimento da tecnologia.

7.1 O plano de desenvolvimento da pesquisa

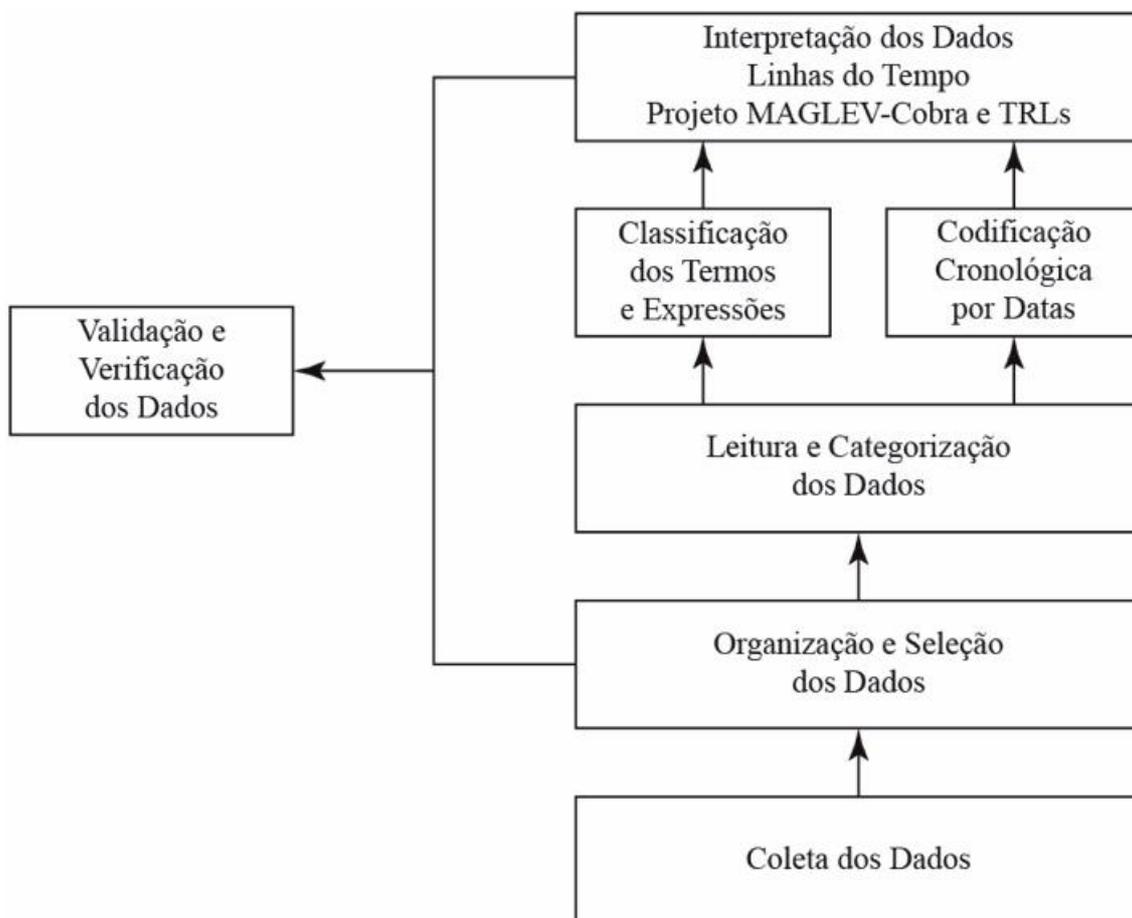
O plano de desenvolvimento da pesquisa utiliza abordagem analítica, estruturada por um conjunto de atos ordenados sequencialmente para coleta e análise dos dados, e um conjunto de atos externos para sua validação e verificação (CRESWELL, 2010). O plano está representado no Quadro 6 adiante.

Essa abordagem analítica foi criada para atender os propósitos exploratórios da pesquisa e proporcionar melhor conhecimento do projeto MagLev-Cobra. Ela adota uma forma linear, hierárquica, de baixo para cima, que se inicia com a coleta de dados sobre o projeto MagLev-Cobra mediante o uso de múltiplas fontes de evidências. Em seguida, prossegue com uma sequência de atos ordenados, compreendendo a organização, seleção, leitura e categorização das informações obtidas.

A validação e a verificação dos dados constituem atos externos, porque ocorrem em paralelo à abordagem linear da pesquisa. Assim, à medida que prosseguimos com a organização, seleção, leitura, classificação e análise dos dados, retornamos à equipe dos engenheiros do Lasup para a validação e verificação do material pesquisado. Em suma,

existe uma inter-relação entre os atos sequenciais de organização, seleção, classificação e análise dos dados e os atos externos de validação e verificação.

Quadro 6 - Plano de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Quadro adaptado (CRESWELL, 2010, p. 218).

Com base nesse plano, descrevemos abaixo os atos que constituem os procedimentos metodológicos da pesquisa qualitativa sobre o estudo do projeto MagLev-Cobra.

7.2 Coleta dos dados

A coleta de dados sobre o projeto MagLev-Cobra incluiu as seguintes fontes de evidências: entrevistas, documentação e observação. Os dados pesquisados compreendem o período de 1990 a 2016, sendo que só foram coletados dados relacionados ao desenvolvimento da tecnologia. As informações que diziam respeito às questões acadêmicas ou administrativas, concernentes às instituições envolvidas, foram descartadas.

Por se tratar de uma pesquisa qualitativa, as entrevistas foram feitas com o objetivo de estimular os entrevistados a falar livremente sobre o projeto MagLev-Cobra. As entrevistas foram pautadas por relações informais, tendo em vista o contato profissional direto mantido de longa data entre a entrevistadora e os entrevistados. As perguntas eram abertas, preservando a forma não estruturada, intercaladas com conversações fluidas sobre o desenvolvimento da tecnologia no contexto do projeto.

Quanto a sua natureza, as entrevistas apresentaram caráter dialógico, estabelecendo uma relação de troca **Eu-Tu** (BUBER, 2009), fundada na interação do diálogo entre a entrevistadora e o entrevistado. Trata-se, portanto, de uma relação de dupla face, obtida em encontros de dois sujeitos. Isso significa dizer que o entrevistado não é objeto de classificação ou mesmo reduzido a uma limitação de respostas únicas. Ao contrário, ele dialoga com a entrevistadora em um processo dinâmico, marcado pelo encontro de um com outro. Como ensina Bartholo Junior (2001, p. 11), “falar com quem nos diz que a fala mais propriamente humana é a resposta à locução de um Tu, no encontro face a face com a pessoa do outro”.

Nesse contexto, a dimensão das entrevistas na perspectiva fenomenológica do projeto MagLev-Cobra consistiu em permitir que o entrevistado pudesse contar a experiência vivida no desenvolvimento da tecnologia a partir de sua própria história de vida. Nessa linha de raciocínio, é imprescindível considerar a herança cultural do entrevistado, bem como a natureza situada da entrevista em dado espaço e tempo. Isso ocorre porque a entrevista tem uma singularidade. Ela não pretende ser universal (BARTHOLO JUNIOR, 2001, 2013b).

Essa característica de singularidade da entrevista fica, ainda, mais evidente quando se trata do tema sobre o amadurecimento de uma tecnologia, pois a dimensão do conhecimento do engenheiro muda à medida que diminuem incertezas e aumenta o domínio sobre o assunto tratado. Assim, cada fase de um projeto de P&D tem suas peculiaridades, que condicionam diferentes modos de pensar e de agir e, conseqüentemente, diferentes formas de se relacionar com a realidade e com o outro.

Para atender ao plano de desenvolvimento da pesquisa, os procedimentos de realização das entrevistas para a coleta de dados foram divididos em duas fases. As entrevistas foram precedidas de carta convite e termo de autorização de identificação e gravação de depoimentos, conforme minutas inseridas nesta dissertação na forma dos Apêndices D e E. Alguns depoimentos foram dados mediante anotações.

A primeira fase consistiu de entrevistas com o coordenador do projeto, professor Richard Magdalena Stephan, feitas no período de março a junho de 2014, na sala G-110, bloco G, do Centro de Tecnologia 1 da UFRJ. As entrevistas eram semanais, com duração de cerca de duas horas, e seguiam um roteiro de perguntas abertas, como já mencionado. Elas tinham, portanto, o objetivo de extrair do entrevistado o relato dos eventos que marcaram o projeto MagLev-Cobra. As perguntas eram aleatórias, com a finalidade de esclarecer algum assunto relacionado à fala do entrevistado ou confirmar algum fato relevante sobre o desenvolvimento da tecnologia.

Logo, os encontros semanais foram marcados por conversas informais e descontraídas, tendo seu conteúdo registrado em anotações feitas à mão pela entrevistadora que, posteriormente, as transformou em relatório sobre o projeto MagLev-Cobra. Essa primeira fase do processo de realização das entrevistas foi muito importante, porque nos proporcionou uma visão geral do projeto e, ao mesmo tempo, um olhar aprofundado sobre a realidade de se desenvolver tecnologia no País, mais especificamente em um ambiente universitário.

Entre a primeira e segunda fases do procedimento de realização das entrevistas, ou seja, o período de julho de 2014 a dezembro de 2015, nos dedicamos aos procedimentos de documentação e observação participante para a coleta de dados. Nesse período, tivemos a oportunidade de participar de reuniões semanais da equipe do Lasup e dos eventos envolvendo o projeto. Além disso, no âmbito da Lei de Acesso à Informação, Lei nº 12.527/2011, nos foi franqueado vistas a documentos oriundos de órgãos/departamentos da UFRJ, por exemplo, a Reitoria e a Agência de Inovação, além de departamentos da Coppe/UFRJ e da Coppetec, tais como Comunicação Social, Arquitetura e Obras, Apoio a Projetos Tecnológicos e Jurídico, para coleta de documentação referente ao projeto MagLev-Cobra.

A documentação abrangeu: (**a**) correspondências, como cartas, memorandos e ofícios; (**b**) documentos administrativos, consistentes em portarias, relatórios, propostas, termos, petições, contratos e convênios; (**c**) estudos formais, como artigos publicados, teses, dissertações, conferências, apresentações em congressos, seminários e demais trabalhos acadêmicos; (**d**) registros em arquivos de mídia, incluindo recortes de jornais, notícias, artigos, filmes e páginas em sítios eletrônicos.

A principal vantagem no manuseio dessa documentação para o estudo do MagLev-Cobra está no fato de se tratar de fonte estável, exata e de ampla cobertura do

projeto, que contribuiu para validar as evidências dos fatos ocorridos ao longo do período pesquisado, bem como permitiu verificar a existência ou não de contradições em evidências. Entre as desvantagens encontradas estão a dificuldade de acesso e o estado de conservação. Devido ao longo período de tempo pesquisado, muitos documentos estavam guardados em depósito de difícil acesso e armazenados em caixas plásticas de arquivo morto que, devido à umidade, comprometeram sua recuperação. Ademais, por terem sido muito manuseados ao longo do tempo, alguns documentos estavam misturados ou incompletos.

A observação participante foi respaldada pelo envolvimento ativo da pesquisadora com a equipe do Lasup. Como observadora participante, foi ocupado o papel de membro transitório, assim como os demais alunos de pós-graduação que entram na equipe para desenvolver um trabalho de pesquisa vinculado ao curso no qual estão registrados. Logo, a técnica de observação participante teve nessa pesquisa caráter artificial, no sentido de que nossa inserção ao grupo se deu com o objetivo específico de realizar a observação voltada exclusivamente para os trabalhos da presente dissertação. Assim, nessa época, não atuamos como consultora externa, mas como pesquisadora que se utiliza da técnica de observação participante para conhecer a equipe do Lasup a partir de seu interior.

Por se tratar de um projeto de longa duração, a equipe do Lasup que trabalha no projeto MagLev-Cobra é dividida entre um grupo de membros permanentes, formada por professores e técnicos vinculados à universidade, e outro grupo de membros transitórios, constituído de alunos de doutorado, mestrado, graduação, de iniciação científica e de programas de jovens aprendizes do ensino médio.

Entre as vantagens experimentadas podemos mencionar o acesso rápido a dados sobre situações habituais vivenciadas pelos membros da equipe, o aprendizado de como são divididas e realizadas as tarefas para promover o amadurecimento da tecnologia e a percepção da realidade sob o ponto de vista dos membros da equipe. Uma desvantagem eliminada no início da pesquisa diz respeito à desconfiança com relação ao acesso a informações confidenciais trocadas durante as reuniões, o que foi sanado mediante a assinatura de Termo de Confidencialidade proposto pela própria pesquisadora, conforme modelo contido no Apêndice F.

A segunda fase do procedimento foi realizada com membros da equipe do Lasup isoladamente. As entrevistas ocorreram de acordo com a conveniência dos

entrevistados. Assim, as entrevistas foram feitas nos gabinetes dos professores, no ambiente do laboratório ou na própria estação do trem MagLev-Cobra.

As entrevistas foram intensas, apesar do tempo restrito, tendo sido concedido o período de até uma hora para cada entrevistado, perfazendo um total de dez horas de trabalho. Os membros da equipe do Lasup entrevistados foram receptivos às perguntas e demonstraram interesse em relatar as experiências vivenciadas e percepções apreendidas do projeto. O Apêndice G apresenta minuta do roteiro de perguntas feitas aos entrevistados.

7.3 Organização e seleção dos dados

O procedimento de organização envolveu os atos de digitar as anotações, digitalizar opticamente os documentos e transcrever as entrevistas. Já a seleção compreendeu o refinamento dos dados. Como a presente dissertação tem como objetivo mapear o processo de amadurecimento da tecnologia SML, selecionamos apenas os dados que consideramos importantes para este trabalho. Esse procedimento teve o objetivo de reduzir a grande quantidade de dados brutos ao essencial para proporcionar sua análise. Embora tenha ocorrido de forma contínua ao longo de toda a pesquisa, o refinamento se concretizou após a coleta completa dos dados, quando foi possível identificar as evidências capazes de caracterizar a trajetória evolutiva da tecnologia.

Durante o procedimento de organização e seleção dos dados, retornamos à equipe do Lasup para verificação e validação dos dados. Quanto à verificação, buscamos elementos que comprovassem a autenticidade dos dados, especialmente no tocante às condições em que foram elaborados e às motivações que lhe deram origem. Com relação à validação, averiguamos a confiabilidade dos dados, confirmando autor, destinatário, propósito e completude.

7.4 Leitura e categorização dos dados

Ao realizarmos a seleção com o refinamento dos dados, fizemos, concomitantemente, uma leitura inspeccional, mediante sondagem sistemática, para nos ajudar a compreender a estrutura dos dados selecionados, bem como nos preparar para tentar responder às perguntas que estamos propondo no capítulo 1 deste trabalho (ADLER; DOREN, 2011). Após a sondagem sistemática, efetuamos leitura analítica

dos dados para identificar, interpretar e classificar seu conteúdo. Embora Adler e Doren (2011) recomendem essa técnica de leitura para livros, decidimos aplicá-la em todos os tipos de mídia indistintamente, o que nos foi muito útil na realização dos procedimentos metodológicos.

A categorização dos dados foi efetuada à mão, sendo utilizada uma classificação por termos e codificação cronológica por datas. Os procedimentos de classificação e codificação dos dados ocorreram simultaneamente. Durante os procedimentos de leitura e categorização dos dados, criamos um formulário de padronização contendo classificação, codificação e informações básicas sobre cada um dos dados, tais como: tipo de dados, data do evento, expressão-chave, título/subtítulo, autor(es)/parte(s), organização, projeto, programa, agência de fomento/financiamento, resumo, notas complementares, entre outras informações, conforme minuta de Relatório dos dados, constante do Apêndice H.

Na classificação, adotamos os termos e expressões definidos pela Nasa para os TRLs. Com isso, procuramos nos dados palavras-chave e identificamos em que contexto elas foram empregadas. Assim, buscamos reconhecer nos dados selecionados expressões comumente aplicadas no desenvolvimento da tecnologia, como as que se encaixam na categoria de ambiente laboratorial, ambiente relevante ou ambiente operacional e, ainda, as que distinguem placa de ensaio de modelo e de protótipo. Ademais, examinamos como essas palavras-chave aparecem, por exemplo, na documentação e nas entrevistas, e com que frequência foram utilizadas.

Já na codificação cronológica, tivemos a intenção de mapear o amadurecimento da tecnologia por períodos de datas, a fim de projetar uma linha do tempo do MagLev-Cobra. Com isso, optamos por uma codificação aberta, com a finalidade de pinçar palavras-chave com base nas ideias centrais contidas nos dados, situando-as no tempo. Esse procedimento possibilitou a construção de blocos de períodos de datas, nos quais foram agrupados os principais eventos que marcaram o projeto MagLev-Cobra ao longo de sua linha do tempo.

Embora tenhamos optado por uma codificação aberta, a escolha das palavras-chave não foi aleatória. Assim como ocorreu na classificação, partimos de termos e expressões empregados nos TRLs como base para a pesquisa, adaptando-os à realidade do projeto MagLev-Cobra. A decisão de manter a codificação aberta foi tomada para dar maior flexibilidade ao procedimento, permitindo não só inclusão e exclusão de

palavras-chave o quanto fossem necessárias, como também criação e definição de termos e expressões de acordo com a realidade do projeto. O Apêndice C apresenta lista de termos técnicos com as respectivas descrições.

Ao longo dos procedimentos de categorização dos dados, retornamos ao auxílio da equipe do Lasup para verificação e validação dos dados. Nessa fase dos procedimentos metodológicos, a verificação dos dados procurou dar uniformidade à classificação dos termos, enquanto a validação buscou fixar marcos comuns à trajetória do MagLev-Cobra. No fim, o código de palavras-chave se tornou a espinha dorsal do projeto MagLev-Cobra, pois lhe deu forma e sustentação.

7.5 Interpretação dos dados

O procedimento final previsto no plano de desenvolvimento da pesquisa abrange a interpretação dos dados. No caso em tela, projetamos duas linhas de tempo para traçar uma relação entre os principais eventos, classificados por expressões-chave, e as datas em que ocorreram. A primeira tem como objetivo delinear os eventos que assinalam a trajetória evolutiva da tecnologia ao longo do curso do projeto MagLev-Cobra, enquanto a segunda linha do tempo situa o projeto MagLev-Cobra no contexto da evolução do método TRLs. Ambas as linhas consistem em uma escala linear, na qual uma unidade de distância é igual a um determinado período de tempo, permitindo, com isso, a visualização, em ordem cronológica, de uma série de eventos que marca o projeto MagLev-Cobra e estabelece uma relação com o método TRLs.

A primeira linha do tempo compreende o período de 1990 a 2016 e divide o projeto MagLev-Cobra em quatro blocos, que especificam as principais etapas do amadurecimento da tecnologia. Essa divisão do período de tempo em blocos não traduz uma pesquisa quantitativa, nem resulta de uma divisão exata de número de anos ao longo do curso do projeto. Ao contrário, cada bloco assinala um conjunto de etapas que sinalizam o amadurecimento da tecnologia. Assim, cada bloco foi classificado por uma expressão, composta de palavras-chave, identificadas com base nos TRLs. Os blocos de períodos delimitam, portanto, o tempo percorrido pela equipe do Lasup para realizar cada etapa do amadurecimento da tecnologia, de acordo com as especificações do projeto e a realidade do contexto no qual se erigiu.

Segue o Quadro 7, que apresenta a linha do tempo do projeto MagLev-Cobra contendo o período de 1990 a 2016, dividido em quatro blocos, indicando os eventos que marcaram a trajetória evolutiva da tecnologia ao longo do curso do projeto MagLev-Cobra.

Quadro 7 - Linha do tempo do projeto MagLev-Cobra.

1990 a 2000	2000 a 2006	2007	2008 a 2012	2012 a 2016
<p>1990 a 2000: DELIMITAÇÃO DO CAMPO 1990: Linhas de pesquisa científica: (a) mancais magnéticos (b) sensores giroscópios (c) limitadores de correntes (d) armazenadores de energia (e) veículo de levitação magnética 1993: Supercondutividade: conceito observado e relatado 1997: Pesquisa aplicada: mancais supercondutores 1998: Criação do LASUP 1998: 15ª Conferência MAGLEV - Japão</p>	<p>2000 a 2006: PROVA DE CONCEITO - LASUP 2000: 16ª Conferência Internacional MAGLEV - Brasil Apresentação do Projeto: veículo MagLev 2001: Pesquisa aplicada da tecnologia SML Construção de pista oval de 30m de extensão Modelo de veículo em escala reduzida Motor linear para veículo de levitação magnética 2006: Testes de desempenho em ambiente laboratorial</p>		<p>2008 a 2012: PROTÓTIPO FUNCIONAL 2008: Demonstração do protótipo em ambiente relevante -Hangar do Bloco I 2010: LASUP Compra dos ímãs da China 2012: Testes de simulação em pista de 12m. Sistema de Física: Levitação Sistema de Tração: Motor Linear Sistema de Mecânica: Protótipo Sistema Eletrônico: Controle de Velocidade</p>	<p>2012: MÓDULO OPERACIONAL 2012: Construção do módulo veicular em escala real e da pista de testes entre os CT 1 e CT 2 - UFRJ 2014: 22ª Conferência Internacional MAGLEV - Brasil Demonstração do protótipo em ambiente operacional 2015/2016: Testes de Desempenho</p>

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao visualizar a linha do tempo do projeto MagLev-Cobra, podemos observar que o primeiro bloco, o qual denominamos de **Delimitação do campo**, engloba o período de 1990 a 2000, marcado por atividades eminentemente acadêmicas voltadas para o Programa de Engenharia Elétrica. Em 1990, o programa definiu cinco linhas de pesquisa: **(a)** mancais magnéticos; **(b)** sensores giroscópios; **(c)** limitadores de correntes; **(d)** armazenadores de energia; **(e)** veículo de levitação magnética. As linhas de pesquisas científicas atendiam a cursos de pós-graduação, visando à produção acadêmica e publicação de artigos. Com o avanço das pesquisas científicas, o programa passou a dar ênfase a estudos das propriedades básicas da supercondutividade, realizando trabalhos experimentais apoiados na observação do conceito. A partir de 1997, iniciou-se a pesquisa com mancais supercondutores, na tentativa de formular aplicações práticas relacionadas aos resultados iniciais obtidos com a pesquisa científica sobre o fenômeno da supercondutividade.

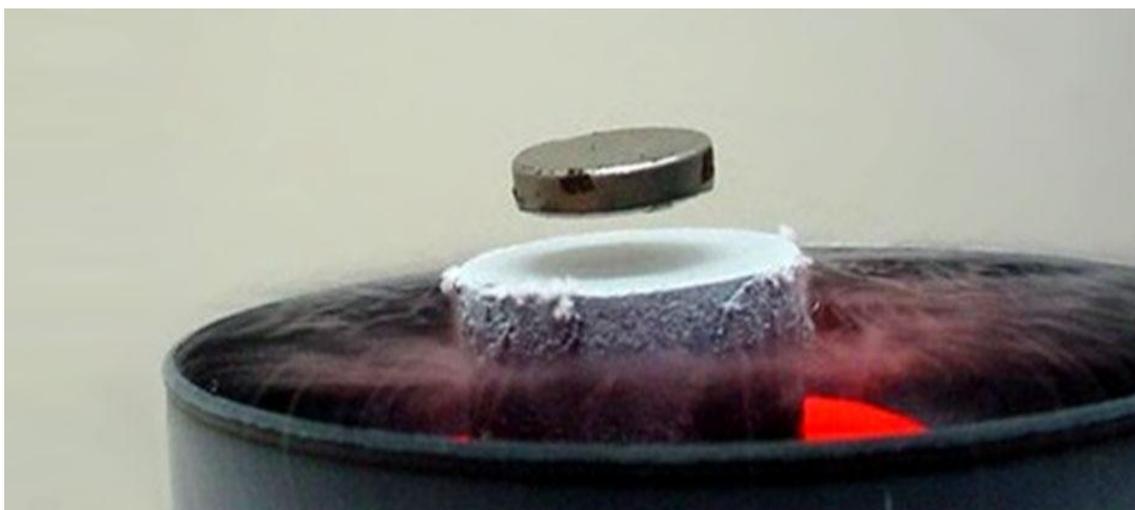


Figura 14 - Foto do fenômeno da levitação magnética.

Fonte: Cedida por Lasup/Coppe/Poli/UFRJ. Disponível em: <<http://www.dee.ufrj.br/lasup/>>. Acesso em 26.04.2016.

Porém, foi somente em 1998 que a delimitação do campo de pesquisa veio a ser definitivamente traçada. Dois eventos balizaram o fechamento desse bloco e foram significativos para a criação do projeto MagLev-Cobra. O primeiro refere-se à fundação do Laboratório de Aplicações de Supercondutores (Lasup), pelos professores Roberto Nicolsky e Richard Stephan, com a constituição da equipe de professores da Poli e da Coppe. O segundo evento diz respeito à participação do professor Roberto Nicolsky na 15ª Conferência Internacional de Sistemas de Levitação Magnética e Motores Lineares

– MAGLEV’ 1998, ocorrida no Japão, em abril de 1998. Naquela época, o professor Roberto Nicolsky conquistou a oportunidade de trazer a 16ª Conferência MAGLEV’ 2000 para o Rio de Janeiro, o que proporcionou grande repercussão e publicidade para o projeto.



Figura 15 - Foto do Lasup.

Fonte: Cedida por Lasup/Coppe/Poli/UFRJ. Disponível em: <<http://www.dee.ufrj.br/lasup/>>. Acesso em 26.04.2016.

O bloco seguinte, caracterizado pela **Prova de conceito**, abrange o período de 2000 a 2006, assinalado por dois eventos relevantes. O primeiro é concernente à apresentação do projeto para a construção de um trem de levitação magnética supercondutora na 16ª Conferência Internacional sobre Sistemas de Levitação Magnética e Motores Lineares – MAGLEV’ 2000, sediada no Rio de Janeiro em junho de 2000. Embora as aplicações da tecnologia SML fossem, à época, apenas especulativas, a equipe do Lasup apresentou na conferência as especificações gerais de seu projeto para a construção de um trem de levitação magnética. O segundo evento é apontado pela validação da característica da tecnologia, que ocorreu mediante a realização de testes de desempenho no ambiente do Lasup. Os testes envolveram a construção de uma pista oval de 30 metros de extensão, além do modelo do veículo em escala reduzida e do motor linear.



Figura 16 - Foto da apresentação da prova de conceito.

Fonte: Lasup/Coppe/UFRJ.

O terceiro bloco, sinalizado como **Protótipo funcional**, contempla o período de 2008 a 2012, determinado por uma série de eventos decisivos no amadurecimento da tecnologia. Esses eventos incluem a construção do protótipo e da pista de 12 metros no hangar do Bloco I, a compra dos ímãs da China, a integração dos sistemas de física, de tração, de mecânica e do sistema eletrônico. Em 2012, foram feitos testes de simulação com o protótipo funcional para eliminar incertezas acerca da tecnologia SML e demonstrar seu desempenho funcional.

Segue a Figura 17, que mostra foto do protótipo funcional levitando sobre pista de 12 metros construída no hangar do Bloco I-2000.

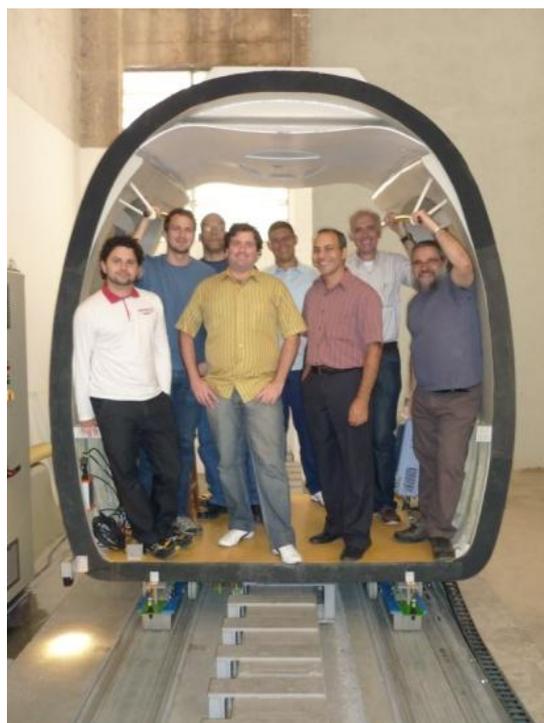


Figura 17 - Foto do protótipo funcional levitando sobre pista de 12 metros no hangar do Bloco I-2000.

Fonte: Cedida por Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

O quarto e último bloco, designado como **Protótipo operacional**, se inicia em 2012 e segue seu curso até os dias de hoje, com a realização de testes de desempenho da tecnologia em ambiente operacional. Esses testes deverão ser feitos ao longo de todo o ano de 2016. Embora ainda não tenha sido concluído, o quarto bloco já pode ser reconhecido e classificado em decorrência de três importantes eventos. O primeiro consiste na construção do módulo veicular em escala real e da pista de teste entre os Centros de Tecnologia 1 e 2 da UFRJ, durante os anos de 2012, 2013 e 2014. O segundo resultou na demonstração do protótipo operacional durante a 22ª Conferência Internacional sobre Sistemas de Levitação Magnética e Motores Lineares – MAGLEV’ 2014, em outubro de 2014, com a participação de especialistas nacionais e estrangeiros. Por fim, o terceiro evento, que teve início em 2015 e continua em andamento, consiste na realização de testes operacionais.

Segue a Figura 18 com fotos da pista experimental e do módulo operacional.



Figura 18 - Fotos da pista experimental e do módulo operacional entre o CT 1 e o CT2.

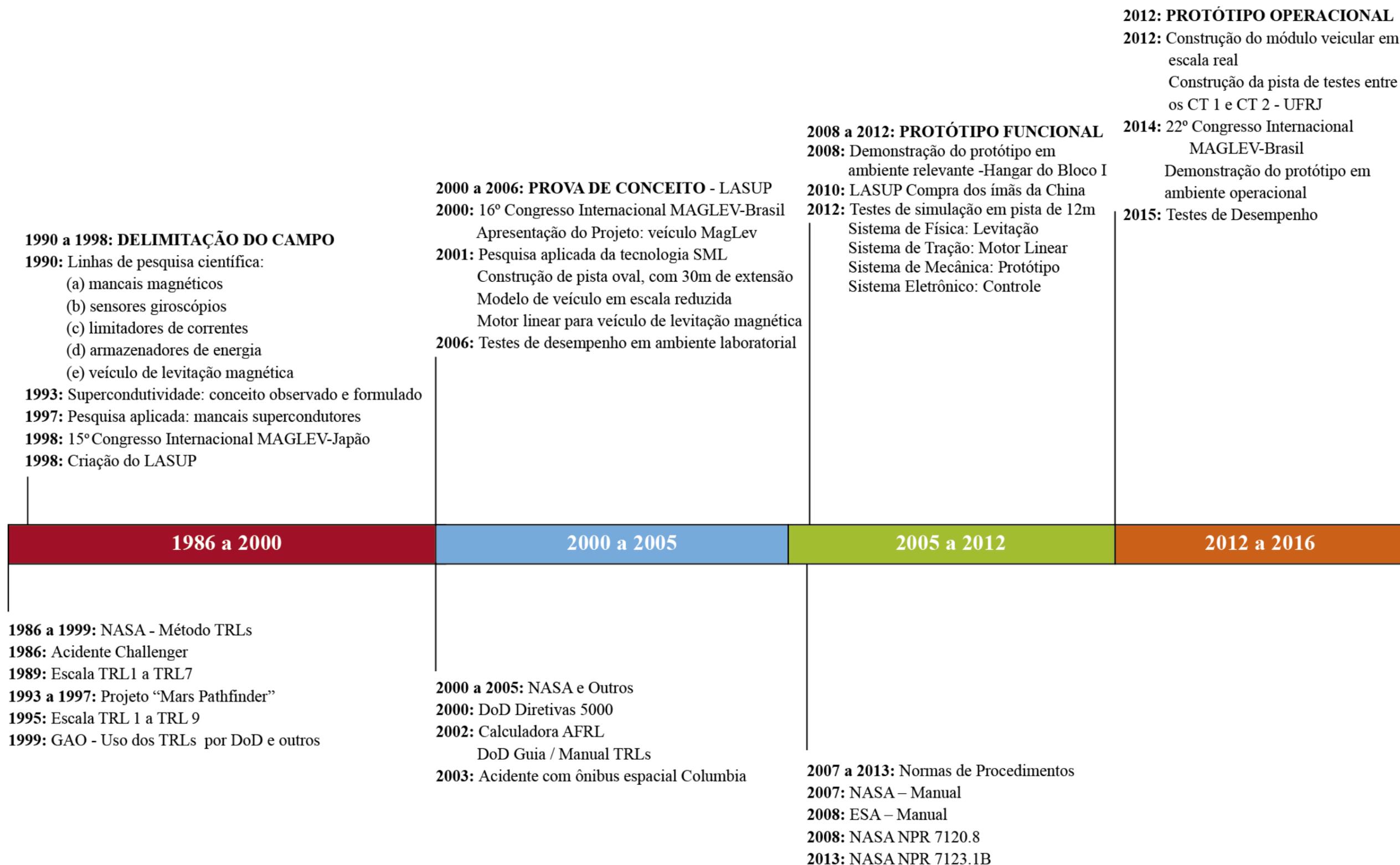
Fonte: Cedidas por Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

Para maior compreensão e melhor visualização dos eventos que marcaram o amadurecimento da tecnologia ao longo do curso do projeto MagLev-Cobra em face à evolução do método TRLs, projetamos uma segunda linha do tempo. Nessa nova trajetória, acrescentamos, aos quatro blocos de período da primeira linha do tempo, três blocos que apontam os principais eventos acerca da evolução do método TRLs, conforme apresentado no capítulo 3 desta dissertação.

Assim como a primeira, essa segunda linha do tempo também apresenta escala linear, contendo, no entanto, o período de 1986 a 2016, alinhado em duas dimensões. Uma dimensão está voltada para a parte de cima da escala e registra os eventos do projeto MagLev-Cobra, enquanto a outra, situada na parte de baixo, traça alguns apontamentos que delineiam o método TRLs. A razão para projetarmos essa segunda linha se deve à necessidade de visualizar a evolução da ferramenta da Nasa em comparação com o processo de desenvolvimento do projeto MagLev-Cobra, ambos abarcados no mesmo espaço de tempo.

Segue o Quadro 8, que apresenta a segunda linha do tempo, compreendendo o período de 1986 a 2016, marcado por blocos que projetam a relação dos eventos caracterizadores do projeto MagLev-Cobra e dos assentamentos do método TRLs.

Quadro 8 - Linha do tempo do período 1986 a 2016. Projeção da relação MagLev-Cobra / método TRL.



Fonte: Elaborado pela autora.

Diante desse quadro, podemos observar o seguinte:

Nesse primeiro período entre 1986 e 2000, verifica-se que, enquanto o Programa de Engenharia Elétrica já havia iniciado estudos sobre o conceito da supercondutividade em seu estado da arte, a Nasa começava a criar o conceito da métrica para avaliar a prontidão de tecnologias e desenvolvia sua primeira escala de TRLs. A escala de nove níveis só foi de fato implementada em 1995, e era voltada, exclusivamente, para os projetos de desenvolvimento de tecnologias espaciais da Nasa. Durante a década de 1990, a Nasa começou a implementar a escala TRLs não só para gerenciar o desenvolvimento de tecnologias, mas também para permitir uma comunicação mais eficaz entre pesquisadores e engenheiros de um mesmo programa e/ou projeto. Já o Programa de Engenharia Elétrica da Coppe/UFRJ começava a criar a base de sustentação do seu projeto MagLev-Cobra com a criação de linhas de pesquisa científicas e a fundação do Lasup.

No período de 2000 a 2005, o Lasup iniciou seu projeto de desenvolvimento de tecnologia com a realização da prova de conceito. Como mencionamos anteriormente no capítulo 6, o manual da Nasa recomenda que, nessa fase inicial do projeto, seja feita uma avaliação da prontidão da tecnologia. Essa avaliação tem a finalidade de estabelecer uma linha de base do estado da arte em que se encontra a tecnologia no começo do ciclo de vida do projeto, e servirá de comparação em futuras avaliações a serem realizadas ao longo de seu curso. Entretanto, ao observar a linha do tempo, verificamos que, nesse período, não havia ainda um método de aplicação da escala TRLs. A Nasa, o DOD e o AFRL passaram, então, a estabelecer diretivas, instruções, guias, manuais, e até mesmo uma calculadora, para auxiliar seus engenheiros na avaliação da maturidade de tecnologia.

Naquela época, o método TRLs ainda não havia se tornado uma ferramenta de uso comum na engenharia de produção e, por isso, não era utilizado como exemplo de melhores práticas na gestão de projetos de inovação. No Brasil, não se tinha conhecimento dessa métrica. Aqui, como nos demais países do mundo e até mesmo nos Estados Unidos, não havia conscientização no meio acadêmico da necessidade de se realizar uma avaliação da maturidade de tecnologia em projetos de P&D. Assim, mesmo sem uma avaliação inicial da maturidade da tecnologia, nos moldes da escala TRLs, o projeto MagLev-Cobra seguiu seu curso.

O período seguinte (2008 a 2012) foi de grande importância, pois, pela primeira vez desde sua criação, o projeto MagLev-Cobra saía do ambiente laboratorial. Nesse período, foi construído um protótipo em escala real para ser testado em ambiente relevante, com a integração de todos os sistemas, subsistemas e componentes. Em contrapartida, nesse mesmo período, a Nasa fixava procedimentos e requisitos para a realização de seus programas e projetos de desenvolvimento de tecnologia. Nessa época, o método TRLs passou a ser implementado como melhores práticas, tanto pela Nasa como por outras organizações públicas e privadas. Porém, não havia consenso sobre como usá-lo, e os procedimentos eram apenas recomendados e descritos em guias e manuais. Na Nasa, os requisitos e procedimentos para a avaliação da tecnologia com a aplicação do método TRLs foram fixados no Apêndice G de seu “Manual de Engenharia de Sistemas” somente em 2007 (NASA, 2007).

Por fim, o período que se iniciou em 2012, e continua em andamento no corrente ano de 2016, é marcado por requisitos e procedimentos que determinam a aplicação do método TRLs na avaliação da maturidade da tecnologia em projetos da Nasa. Vale notar que, em 2013, a Nasa tornou mandatória a norma NPR 7123.1B, que regula os requisitos e procedimentos de engenharia de sistemas, na qual consta, como Apêndice E, o quadro dos níveis de prontidão de tecnologia para *hardware* e *software*. Além disso, no mesmo ano de 2013, a ISO aprovou sua norma internacional de padronização dos níveis de prontidão de tecnologia que, somente agora, no fim do ano de 2015, ganhou versão em português publicada pela ABNT. Nesse ínterim, o projeto MagLev-Cobra deu seguimento aos testes de desempenho com seu protótipo operacional.

8 O CICLO DE VIDA DO PROJETO MAGLEV-COBRA

Neste capítulo 8, continuaremos a pesquisa de campo para proceder ao refinamento da categorização dos dados e eventos coletados e analisados. O objetivo é identificar as fases do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra. O ciclo de vida é um dos conceitos fundamentais da engenharia de produção, utilizado na gestão de sistemas. Nessa altura, passaremos a considerar a categorização de tudo o que foi e o que deve ser feito durante o ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra. Como ferramenta de gestão, o ciclo de vida será traçado para dividir o projeto MagLev-Cobra em fases distintas, separando-as por pontos-chave de decisão. Assim, faremos o mapeamento das séries temporais para caracterizar o desenvolvimento da tecnologia SML ao longo das fases do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra. Durante este capítulo, abordaremos as questões propostas no capítulo 1.

8.1 As etapas do desenvolvimento da tecnologia SML no ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra

Essa ferramenta é geralmente utilizada no início do projeto, mas pode ser aplicada a qualquer momento de seu curso. Como instrumento de gestão, o ciclo de vida funciona como um mapa que traça não só o caminho a ser percorrido, mas também o que já foi realizado no projeto. Quando elaborado no início, o ciclo de vida ajuda o gestor a prever o futuro do projeto, antevendo suas fases e os marcos que caracterizam os pontos-chave entre elas. Ao longo do curso do projeto, esse mapa serve para visualizar o que já foi feito e o que está por vir, permitindo que o gestor crie novas rotas ou desvie de possíveis riscos ou obstáculos. Assim como as revisões técnicas, o ciclo de vida deve ser documentado ao longo do processo de planejamento do projeto (NASA, 2007, 2013).

No caso do MagLev-Cobra, identificamos que o ciclo de vida do projeto foi delineado com base nos recursos financeiros arrecadados pela Coppe/UFRJ, e condensado em quatro grandes blocos de etapas, como demonstrado no capítulo 7. O desenvolvimento da tecnologia dependia, portanto, das entradas de recursos, que acabavam por impulsionar o projeto, movendo-o de um bloco de fases para o seguinte.

Esse é um ponto relevante, porque mostra exatamente como funcionam as políticas públicas e o porquê é tão difícil desenvolver tecnologia em nosso País. No Brasil, o planejamento do projeto está voltado para a captação dos recursos e não para o desenvolvimento da tecnologia em si, o que deveria ser a prioridade. Isso significa dizer que os recursos não são alocados para a realização integral do projeto, do início ao fim. Eles são captados por etapas e por diferentes agências de fomento.

Com isso, cada etapa do desenvolvimento de tecnologia é entendida como um projeto em si, ou seja, é vista isoladamente, o que gera incerteza quanto a sua continuidade. Em outras palavras, o que determina o planejamento do projeto são as políticas públicas, as disponibilidades das agências de fomento e as entradas efetivas dos recursos no caixa do projeto. Como esse planejamento é voltado para uma etapa específica do projeto, limitada pela disponibilidade dos recursos financeiros, não há continuidade das atividades necessárias ao amadurecimento da tecnologia, a ponto de desenvolvê-las, para que atinjam um nível no qual possam vir a se tornar um produto ou processo a ser inserido no mercado.

Assim, com foco na tecnologia, procuramos identificar tudo o que foi feito para promover seu desenvolvimento até a presente data. Acreditamos, com isso, que o ciclo de vida do projeto nos permite examinar as proposições teóricas apresentadas nesta dissertação. Para tanto, desmembramos os quatro blocos de etapas do projeto, mencionados no capítulo 7, a fim de identificar cada uma das fases.

Nesse contexto, partimos da nomenclatura do manual da Nasa (2007) para a gestão de projetos de pesquisa e tecnologia, e dividimos o ciclo de vida do MagLev-Cobra em sete fases, que se inicia com a Pré-fase A e segue alfabeticamente da Fase A até a Fase F. Embora não possua a dimensão de um projeto de pesquisa e tecnologia como os projetos da Nasa, em termos de custos e de engenharia de sistemas, o MagLev-Cobra é, sem dúvida, um projeto de inovação tecnológica, cujo ciclo de vida deve ser analisado sob a perspectiva do ambiente universitário e de acordo com a realidade de nosso País.

Isso significa dizer que não pretendemos seguir minuciosamente o manual da Nasa, apresentando uma listagem do que foi e o que não foi feito, como se estivéssemos seguindo um catálogo de como fazer um projeto de P&D. Ao contrário, neste trabalho pretendemos identificar, nas séries temporais, as fases do ciclo de vida do projeto

MagLev-Cobra para apontar os pontos-chave de decisão, bem como as ações que mostram a trajetória evolutiva da tecnologia, tendo como referência os TRLs.

Os KDP são como portais de passagem entre uma fase e outra no ciclo de vida do projeto (NASA, 2007, 2013). Eles marcam os eventos nos quais os engenheiros se basearam para determinar a progressão do projeto. Nesse sentido, o estudo do caso MagLev-Cobra apresenta-se como um fenômeno de grande valia, porque os eventos apontam para a trajetória evolutiva da tecnologia.

Logo, desmembrar o ciclo de vida do projeto em fases distintas nos permitiram um olhar diferenciado sobre o processo de desenvolvimento da tecnologia, identificando possíveis evidências que caracterizaram seu amadurecimento. Além disso, traçamos os pontos-chave não como sinais de captação de recursos financeiros, mas sim como marcos que fundamentaram a tomada de decisão do coordenador do projeto na trajetória evolutiva da tecnologia. O objetivo deste trabalho é, portanto, proporcionar maior visibilidade ao avanço tecnológico em cada uma de suas fases. É como se abrissemos as dobras do mapa e olhássemos para ele com uma lupa.

Além das obras citadas neste trabalho, Apêndice A apresenta uma lista de artigos e trabalhos científicos sobre o projeto MagLev-Cobra que foram consultados e evidenciam as etapas de desenvolvimento da tecnologia.

O Quadro 9, a seguir, apresenta as fases do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra.

Quadro 9 – Ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra.

FASES DO PROJETO	FORMULAÇÃO			APROVAÇÃO	IMPLEMENTAÇÃO			
	PRÉ-FASE A	FASE A	FASE B		FASE C	FASE D	FASE E	FASE F
DESCRIÇÃO	Estudos dos conceitos	Desenvolvimento do conceito e da tecnologia	Conclusão do desenvolvimento da tecnologia e do plano do projeto preliminar		Projeto final e fabricação	Montagem do sistema, integração e testes, demonstração técnica	Lançamento, operações e manutenção do sistema	Término
PERÍODO	1990 a 2000	2000 a 2006	2008 a 2010		2010 a 2012	2012 a 2014	2015 a 2016	2016...
APOIO	CNPq	CAPES CNPq FAPERJ	FAPERJ; INT/LABER; EQUACIONAL		FAPERJ; BNDES; OAS; VALLOUREC; AKZO NOBEL; WEG; WHITE MARTINS; EQUACIONAL; HOLOS BRASIL		FAPERJ	
MARCO	Viabilidade do projeto	Definição do projeto	Definição do sistema; início do <i>design</i>		Final do <i>design</i>	Montagem do sistema; integração e testes	Operações	Liquidação
TECNOLOGIA	- Princípios básicos observados e relatados.	- Conceito e aplicação da tecnologia; - Prova de conceito característico.	- Validação da maquete do subsistema no ambiente do laboratório; - Lasup/Coppe.	- Validação do protótipo funcional em ambiente relevante; - Hangar do Bloco I-2000.	- Demonstração do protótipo do sistema em ambiente relevante; - Hangar do Bloco I-2000.	- Demonstração do módulo operacional na pista experimental entre o CT1 e o CT2.	- Sistema MagLev-Cobra real e completo, qualificado para lançamento por meio de testes operacionais.	
EVENTOS	- Conferência Int. MAGLEV' 1998 – Japão; - criação do Lasup.	- Conferência Internacional MAGLEV' 2000 – Rio de Janeiro.	- Seminário em homenagem ao professor Roberto Nicolsky; - Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT); - Conferência Faperj 2011.		- Conferência Rio+20 - Aprovação do Projeto – BNDES; - SNCT.	- Conferência Internacional MAGLEV 2014 – Rio de Janeiro; - SNCT.	- SNCT; - Troféu Frotas e Fretes Verdes.	
DOCUMENTOS	- Requisitos preliminares do projeto (PPR).	- Plano de definição do projeto (PDP); - KPP; - TDP.	- TDP: a) escala operacional; b) campo de aplicação; c) controle de custos. - Revisão dos requisitos do sistema (SRR).	- TDP: a) sistema físico; b) sistema de tração; c) sistema mecânico. - Revisão da definição do sistema (SDR); - PPP.	- Projeto final; - Plano de engenharia; - Plantas arquitetônicas; - Revisões de testes de sistemas.	- Revisão operacional do sistema; - Plano de montagem; - Revisão do <i>status</i> do sistema operacional - Revisão da integração do sistema; - Teste de funcionamento.	- Livro de registro de passageiros / visitantes.	
RESULTADOS	- Linhas de pesquisa; - Publicação em artigos científicos; - Trabalhos em congressos; - Livro; - Avaliação CNPq; - Relatório ao Colegiado do Programa de Engenharia Elétrica.	- Protótipo em escala reduzida; - Construção da pista oval de 30m; - Testes de simulação; - Publicação de artigos científicos; - Trabalhos em congressos; - Avaliação Capes, CNPq e Faperj.	- Maquete do subsistema em escala real; - Testes de simulação de desempenho; - Publicação de artigos científicos; - Trabalhos em congressos; - Avaliação Faperj.	- Testes de simulação com o protótipo funcional; - Publicação de artigos científicos; - Trabalhos em congressos; - Avaliação Faperj; - Pedidos de patentes.	- Protótipo operacional do sistema; - Pista experimental entre CT1 e CT2 - Avaliação do Colegiado do PEE; - Avaliação do Cons. Deliberativo; - Avaliação Faperj; - Avaliação BNDES.	- Demonstração técnica do módulo operacional na MAGLEV' 2014, em 1 out. 2014. - Publicação de artigos científicos; - Trabalhos em congressos; - Avaliação Faperj; - Avaliação BNDES.	- Lançamento e início das operações abertas ao público; - Manual de operação e o de manutenção; - Estudos de sistemas de transporte inteligente (ITS) e automação de mobilidade de pessoas (APV); - Estudos do Plano Diretor de Transporte Urbano (PDTU).	

Fonte: Elaborado pela autora.

8.2 Pré-fase A: estudos dos conceitos

Essa é a fase preliminar do ciclo de vida do projeto, na qual são realizados estudos dos conceitos científicos. A Pré-fase A compreende a base da plataforma do conhecimento tecnológico. É exatamente nesse estágio que os engenheiros vão construir as fundações do saber para dar sustentação ao desenvolvimento da tecnologia.

Com relação ao MagLev-Cobra, nessa fase inicial, não havia um projeto de inovação tecnológica propriamente dito, e nem mesmo a ideia de se desenvolver um trem de levitação magnética supercondutora. O foco estava na pesquisa científica. Por se tratar de um instituto de tecnologia em ambiente universitário, foram criadas linhas de pesquisa, selecionados os alunos de pós-graduação e formada a equipe.

As pesquisas se resumiam à observação do mundo físico, reprodução de experimentos anteriormente publicados, verificação de ideias soltas – que podiam, até mesmo, não ter conexão clara com o objeto pesquisado – e a identificação dos princípios básicos, nos quais os conceitos científicos foram formulados e poderiam dar sustentação à criação de uma nova tecnologia. A ênfase estava na produção acadêmica e, com base nela, se buscava a construção de uma inovação que pudesse resultar em um produto ou processo. Os resultados geraram não só a produção acadêmica, mas também a viabilidade de propostas para futuras pesquisas aplicadas (GOMES; SOTELO; STEPHAN, 2004; STEPHAN et al., 2002a, 2002b;).

Em 1993, teve início a pesquisa científica para observação e relato do fenômeno da supercondutividade. Em 1997, ou seja, quatro anos depois, os resultados produzidos começaram a ser traduzidos na pesquisa aplicada sobre mancais supercondutores com a realização dos primeiros trabalhos experimentais (DAVID et al., 1998; STEPHAN et al., 1999, 2013). Porém, a ida do professor Roberto Nicolsky à Conferência Internacional sobre Sistemas de Levitação Magnética e Motores Lineares – MAGLEV, ocorrida no Japão em 1998, foi decisiva para a possibilidade de construção de um trem de levitação magnética no Brasil.

A análise dos dados e a categorização dos eventos ocorridos nessa Pré-fase A nos permite identificar algumas evidências que, em tese, podem caracterizar o amadurecimento da tecnologia com relação aos princípios básicos relatados e observados (TRL 1), baseados nos critérios de padronização estabelecidos por

organizações como Nasa, ESA e ABNT – ISO. Os projetos receberam o apoio do CNPq, e as pesquisas deram retorno com a produção acadêmica em dissertações, teses e seminários que geraram ideias e oportunidades para a criação de novas tecnologias. A publicação de nove artigos e trabalhos científicos em revistas indexadas e anais de congressos, bem como um livro sobre mancais magnéticos, atendem ao critério de saída estabelecido pelos requisitos da Nasa.¹²

Como preconiza as recomendações da ESA, os projetos vinculados às cinco linhas de pesquisa foram avaliados pelo Comitê de Assessoramento do CNPq, formado por consultores *ad hoc* que aprovaram a concessão de bolsas de estudos. Dentre esses projetos encontrava-se o de construção de veículo de levitação magnética, aprovado pelo CNPq em razão do potencial da tecnologia e da viabilidade de futuras pesquisas de P&D, o que, de fato, possibilitou o avanço do projeto para a fase seguinte.

As entrevistas por nós conduzidas no laboratório com os membros da equipe e os documentos analisados nos permitiram reconhecer uma série de atividades realizadas nessa Pré-fase A. Essa série contribuiu para o fortalecimento das metas e da estrutura do Programa de Engenharia Elétrica, no sentido de que as linhas de pesquisas criadas possibilitaram o desenvolvimento de projetos em sintonia com o estado da arte da tecnologia.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa em supercondutividade buscou desenvolver os conceitos iniciais de diferentes métodos de levitação magnética e analisar os requisitos-chave de cada um deles. Para tanto, foram realizados experimentos com modelos e placas de ensaio ou protótipos em laboratório, além de testes de simulação para validar esses conceitos (DAVID et al., 1998; GOMES; SOTELO; STEPHAN, 2004; NICOLSKY et al., 1999; STEPHAN et al., 1999, 2002a, 2002b). Quando os engenheiros conseguiram estabilizar a levitação de um disco, empregando a propriedade diamagnética de supercondutores de HTS, perceberam que poderiam desenvolver o projeto de construção de um veículo de SML como uma alternativa de transporte economicamente viável.

Os PPR foram, então, formulados para identificar os elementos científicos, bem como sistemas, subsistemas e componentes básicos pesquisados. Por se tratar de uma fase inicial, esse documento foi elaborado para atender aos requisitos da agência de

¹²Cf. Apêndice B.

fomento. Com isso, a ênfase estava no desenvolvimento da tecnologia. As estimativas de custos, cronograma e riscos associados eram, portanto, incipientes. A estratégia consistia em obter recursos para a próxima fase.

Nesse contexto, identificamos uma série de fatores que levaram o coordenador à tomada de decisão no KDP A do ciclo de vida do projeto, avançando o projeto da Pré-fase A para a Fase A. Os resultados das pesquisas, a criação do Lasup, a formação da equipe de engenheiros e técnicos, a produção acadêmica, com a apresentação dos trabalhos acadêmicos em congressos e publicação em anais de congressos, além da publicação de artigos científicos em periódicos indexados, permitiram ao coordenador examinar e concluir que a maturidade dos aspectos técnicos era satisfatória para que o projeto pudesse avançar para a próxima fase.

Nessa Pré-fase A, os recursos disponíveis eram basicamente a infraestrutura da universidade, com suas instalações e seus equipamentos, e as bolsas de estudos concedidas pelo CNPq para professores e alunos. As pesquisas eram realizadas em diversos laboratórios e podiam se locomover, dependendo da necessidade do uso de determinado equipamento e de sua disponibilidade. Vale lembrar que o Lasup só foi criado em 1998. Em verdade, a cessão do espaço do laboratório ocorreu em 1998, mas o Lasup só se estabeleceu em 2000, com a inauguração do Bloco I do Centro de Tecnologia 1 da UFRJ. Nessa fase, as pesquisas científicas tiveram caráter acadêmico e, portanto, não receberam recursos de organizações privadas. Não havia, à época, uma política de governo voltada especificamente para o desenvolvimento desse tipo de tecnologia. As partes interessadas se restringiam à universidade, às agências de fomento e aos professores, servidores técnico-administrativos e alunos.

8.3 Fase A: desenvolvimento do conceito e da tecnologia

Uma vez selecionado o projeto para a construção de um veículo de levitação magnética, a linha de pesquisa passou a ser direcionada para a escolha da tecnologia, a formulação de sua aplicação e a prova de conceito característico.

A escolha da tecnologia envolveu pesquisas sobre as técnicas MagLev promissoras para aplicações em transporte de passageiros, ou seja, as de levitação eletrodinâmica (EDL), eletromagnética (EML) e magnética supercondutora

(SML)¹³(STEPHAN et al., 2013, p. 4-7). Apesar de, a princípio, parecer simples, o processo de escolha da técnica consistia, em verdade, em uma tomada de decisão bastante complexa, pois se resumia entre a opção de desenvolver um conceito novo ou a de aperfeiçoar um dos já existentes, o que implicaria também uma análise dos custos, cronograma de tempo e riscos associados.

A técnica EDL já havia sido testada, em escala real, pelo Japão na linha de teste de Yamanashi, e a técnica EML, pela Alemanha, com o Projeto Transrapid, ou seja, projetos em que a prontidão da tecnologia se encontrava nos níveis avançados. Já a técnica SML está sendo desenvolvida pelo projeto SupraTrans, por meio de um consórcio entre o Instituto IFW Dresden,¹⁴ universidades e indústrias alemãs, bem como pelo Laboratório de Aplicação de Supercondutividade da Southwest Jiatong University, localizada na cidade de Chengdu, província de Sichuan, na China.¹⁵ Todavia, naquela época, a tecnologia SML desenvolvida por alemães e chineses encontrava-se ainda na fase da prova de conceito, com a realização de testes com modelos em escala reduzida, o que conferia a essa tecnologia originalidade e oportunidade de inovação a ser explorada (HAAS et al., 2005; STEPHAN et al., 2008).

Com o conhecimento gerado, os engenheiros decidiram assumir os riscos técnicos e optaram por desenvolver a tecnologia SML. Além da possibilidade de se explorar um campo ainda não dominado, concluiu-se que a levitação magnética supercondutora apresentava-se como uma solução mais vantajosa para as necessidades do País em transporte de passageiros. Nessa Fase A, a equipe do Lasup traçou, então, um TDP.

Por se tratar de inovação tecnológica, sem similar no Brasil e no mundo, a equipe do Lasup não tinha nenhuma experiência anterior sobre a SML, e não podia se basear nas arquiteturas e tecnologias desenvolvidas pelo Japão e pela Alemanha para os trens de levitação magnética da linha de teste de Yamanashi e da Transrapid, pois utilizam a EDL e a EML, respectivamente. Ademais, a SML é uma tecnologia complexa, ainda não explorada comercialmente e com risco significativo para ser ignorado.

¹³Cf. capítulo 9.

¹⁴Disponível em:

<http://www.transrapid.de/cgi/en/basics.prg?session=bd7ab0b357597d5c_513044&a_no=2>.

¹⁵Disponível em: <<http://www.ifw-dresden.de/institutes/imw/research/functional-oxide-layers-and-superconductors/supratrans-ii/>>.

Nesse compasso, a formulação da aplicação da tecnologia envolveu pesquisas para a definição das configurações básicas de engenharia, descrição dos KPP e especificação dos equipamentos. Os resultados dos testes e das simulações efetuados demonstraram a viabilidade técnica. Com isso, a equipe do Lasup elaborou um PDP, a fim de construir um trem de levitação magnética de alta velocidade no Brasil.

A prova de conceito marcou o início das atividades de desenvolvimento da tecnologia e representava, por si só, um mini projeto das funções críticas do sistema, previsto em escala reduzida. Ela foi dividida em duas etapas, abrangendo experimentos físicos e estudos analíticos, ambos efetuados nas instalações do Lasup.

Assim, para validar a aplicação da tecnologia SML na construção de um trem de levitação magnética, a prova de conceito experimental consistiu na construção, dentro do Lasup, de um protótipo de levitação magnética em escala reduzida. Essa prova compreendia a fabricação de uma pista em formato oval, com 30 metros de extensão, contendo trilhos em suas laterais ao longo de todo o percurso (STEPHAN et al., 2002c, 2003b, 2003c, 2004).

Nos trilhos laterais da pista, se prendia uma guia linear formada por ímãs NdFeb que compunham o sistema magnético. Esse sistema interagiu com os supercondutores de YBCO, presos ao módulo veicular, para levitá-lo. O módulo era, então, acionado por um motor linear e percorria o circuito oval sem tocar o chão da pista. Com a intenção de validar os KPP, a prova de conceito analítica incluiu testes de simulação para confirmar que os objetivos e os requisitos de desempenho do módulo veicular estavam definidos com relação ao estado da arte em que se encontrava a tecnologia (DIAS et al., 2008a, 2008b; MOTTA et al., 2008; STEPHAN et al., 2003a).



Figura 19 - Fotos da construção da pista oval e testes de simulação com o protótipo em escala reduzida.

Fonte: Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

Como mencionamos anteriormente, naquela época, o Lasup não efetuou uma avaliação da maturidade da tecnologia nos moldes dos TRLs, de modo a fixar uma linha de base que pudesse determinar o estado da arte em que se encontrava a tecnologia e o nível de amadurecimento desejado pelos engenheiros para a construção do trem de levitação magnética. Porém, a análise dos dados e a categorização dos eventos nos levam a concluir que, nessa Fase A do ciclo de vida do projeto, há evidências que podem identificar o potencial amadurecimento da tecnologia com relação à formulação do conceito e à aplicação da tecnologia (TRL 2), bem como da realização da prova de conceito analítica e experimental (TRL 3) (STEPHAN; ANDRADE JR.; POLASEK, 2005; STEPHAN et al., 2003a, 2003b, 2004).

Os relatórios de pesquisa, os artigos científicos publicados em revistas indexadas, além dos trabalhos apresentados em congressos e registrados em anais, descrevem não só as análises quantitativas, mas também os resultados que validaram as previsões dos parâmetros-chave de desempenho (NICOLSKY et al., 2002; STEPHAN et al., 2001, 2002c).

O TDP abordava, de forma clara e abrangente, objetivos, conceito da tecnologia e sua aplicação, requisitos de desempenho do sistema, entre outros. Acrescente-se, ainda, que esse plano também delineava o ambiente do Lasup onde os estudos científicos foram realizados, e identificava o ambiente operacional prospectivo, lembrando, contudo, que o projeto ainda previa a construção de um trem de levitação magnética supercondutora de alta velocidade.

A apresentação do PDP pela equipe do Lasup à comunidade acadêmica nacional e internacional, durante a 16ª Conferência Internacional – MAGLEV' 2000, ocorrida no Rio de Janeiro de 7 a 10 de junho de 2000, pode ser também caracterizada como uma das evidências que marcaram a trajetória da tecnologia, tendo em vista que esse plano foi, à época, analisado por pares nacionais e internacionais, permitindo a troca de experiências e lições aprendidas com o desenvolvimento da tecnologia (NICOLSKY et al., 2000).

Embora, nessa Fase A, ferramentas, como a TMA e a EAP, pudessem vir a estabelecer uma linha de base inicial compatível com os objetivos do projeto, um conjunto de elementos – o plano de definição do projeto, os resultados analíticos e experimentais dos estudos científicos, os parâmetros-chave de desempenho, os requisitos do sistema e os conceitos operacionais preliminares, entre outros – parece ter

sido suficiente para determinar a tomada de decisão, pelo coordenador, no KDP B do ciclo de vida do projeto, propiciando o avanço do desenvolvimento da tecnologia.

A realização das atividades nessa Fase A só foi possível porque contou com o apoio das agências de fomento, em especial CNPq, Capes e Faperj. Os recursos foram aplicados diretamente em máquinas, insumos e equipamentos para a construção do referido protótipo. No entanto, não foram contabilizadas as despesas fixas e operacionais do laboratório, incluindo, mas não se limitando, os pagamentos de salários dos servidores, pesquisadores, técnicos, secretárias, bem como despesas com bolsas de estudos, pagamentos a terceiros, gastos com insumos e materiais; enfim, tudo o mais necessário a sua manutenção. Essas despesas foram suportadas com recursos oriundos da Coppe/UFRJ.

8.4 Fase B: conclusão do desenvolvimento da tecnologia e plano preliminar do projeto

A Fase B representa a ponte que conecta os resultados das pesquisas científicas e aplicadas, realizadas na Pré-fase A e Fase A, com as atividades de engenharia propriamente ditas, executadas nas Fases C, D e E do ciclo de vida do projeto. Nessa fase, o projeto flui do nível de identificação dos requisitos de desempenho dos componentes para o nível de especificação de conjuntos completos de sistemas/subsistemas e de seus respectivos projetos preliminares. Com isso, os requisitos técnicos do sistema foram detalhados para que os engenheiros pudessem fazer estimativas realistas dos custos e do cronograma de tempo de implementação do projeto.

Nesse contexto, a Fase B assinalou a conclusão das atividades de desenvolvimento da tecnologia SML e o delineamento inicial do projeto de construção de um trem de levitação magnética supercondutora. Para tanto, a equipe do Lasup elaborou um plano de desenvolvimento das tecnologias. As atividades desse plano compreendiam não só a validação da maquete do subsistema veicular para demonstração de sua funcionalidade por meio de testes críticos realizados em ambiente laboratorial, como também a validação do protótipo funcional por meio de testes de simulação para definição das previsões de desempenho em ambiente relevante. Os resultados alcançados contribuíram para o delineamento do plano preliminar do projeto.

Para a verificação funcional dos subsistemas/componentes em ambiente laboratorial, a equipe do Lasup se dividiu, criando três grandes frentes de ação, contemplando as seguintes áreas: **(a)** escala operacional; **(b)** campo de aplicação; **(c)** controle de custos.

Na primeira, os estudos sobre o padrão de desempenho, e os testes sobre a métrica de operação da nova tecnologia foram lideradas pelo professor Rubens de Andrade Junior, com a participação do técnico Ocione José Machado e dos engenheiros Guilherme Gonçalves Sotelo e Daniel Dias, então alunos de doutorado, bem como de outros alunos de pós-graduação e graduação (SOTELO et al., 2010a, 2010b, 2011). Os trabalhos se concentraram, por exemplo, em questões acerca de medidas de força e de como dar vácuo aos criostatos, entre outras. Assim, a equipe elaborou um plano preliminar de custos e escopo do projeto, que incluía a previsão de materiais, insumos, peças, máquinas e equipamentos para a construção de uma maquete do subsistema veicular em escala real.

A maquete do subsistema veicular em tamanho natural foi desenvolvida a partir de uma parceria técnica entre a UFRJ e o INT. O Laboratório da Divisão de Desenho Industrial do INT elaborou estudos para projetar no computador uma maquete do subsistema veicular em três dimensões (3D), empregando métodos de análise ergonômica para definir a aplicação prática do *design* de interior do veículo, com o fim de ajustá-lo aos tamanhos padronizados e adequados ao perfil dimensional do brasileiro. Essa maquete em 3D foi utilizada para demonstrar a funcionalidade básica da tecnologia, mediante testes analíticos e de simulação no computador, e verificar os níveis de desempenho da tecnologia em ambiente laboratorial.



Figura 20 - Foto de teste de validação da maquete em 3D, projetada no computador pelo Laber/INT.

Fonte: Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

Já na segunda frente de ação, referente ao campo de aplicação, o professor Richard Magdalena Stephan contou com o apoio do então professor emérito Amaranto Lopes Pereira, do Programa de Engenharia de Transportes (PET) da Coppe/UFRJ, que trouxe a contribuição da visão de transportes para o projeto. Com isso, os dois professores criaram uma área interdisciplinar, integrando disciplinas dos dois Programas, o de Engenharia Elétrica e o de PET, abrindo espaço para que alunos de pós-graduação dessas áreas fossem acolhidos pelo projeto e desenvolvessem pesquisas em conjunto.

Como o financiamento para essa fase foi concedido pelo governo do Estado do Rio de Janeiro, por meio da Faperj, os estudos passaram a se concentrar na área de transportes do Estado, se limitando, portanto, à mobilidade urbana dentro dessa região, com o fim de avaliar os impactos esperados com a aplicação da tecnologia dentro de seu território. Foi exatamente nesse ponto que o escopo do projeto foi definido. A equipe, então, deixou de focar na construção de um trem de alta velocidade e passou a pensar na aplicação da tecnologia para a construção de um trem urbano de baixa velocidade.

Isso significou projetar um veículo de levitação magnética supercondutora que pudesse se integrar com os demais modais de transporte urbano e circular dentro das cidades, passando por ruas e avenidas. Desse ponto em diante, o estudo do levantamento de campo compreendeu a identificação das oportunidades observadas pelas situações de mercado, características de infraestrutura e, ainda, pelo apoio

resultante das políticas públicas do governo federal e do governo do Estado do Rio de Janeiro (STEPHAN, 2010; STEPHAN; SUCENA; KRUEGER, 2010).

A terceira e última frente de ação, designada para o controle dos custos, foi constituída para que a equipe pudesse atender às exigências da Faperj, apresentando uma planilha para o financiamento da construção do protótipo funcional. Esse estudo incluía projeção de ingressos e desembolsos de recursos financeiros, bem como previsão dos custos com base em tomadas de preço no mercado. Além disso, havia uma projeção para importar os ímãs de terras raras, o que dependia da cotação do mercado internacional e do atendimento à legislação nacional. Com isso, a equipe pôde elaborar um plano de custos, detalhando o cronograma físico financeiro, para projetar os níveis seguintes do projeto no formato de um fluxo de caixa: calculando as entradas, os ingressos dos auxílios concedidos pela Faperj, em sincronia com as saídas de recursos por grupo de despesas.

As anotações das entrevistas com o coordenador do projeto e os documentos analisados mostram potenciais evidências da trajetória de evolução da tecnologia. Os resultados dos estudos forneceram informações que ajudaram na identificação dos componentes-chave da nova tecnologia e dos requisitos de desempenho, bem como a demonstração da capacidade técnica da maquete do subsistema veicular testada no laboratório.

Em continuação às atividades previstas no TDP, a equipe do Lasup passou para a etapa de construção de um protótipo funcional para a validação da tecnologia em ambiente relevante. No caso do MagLev-Cobra, o protótipo funcional compreendia o sistema de levitação magnética construído, em escala real, sobre trilhos de ímãs permanentes. Para criar um ambiente relevante, a equipe do Lasup utilizou um hangar ao lado das instalações do laboratório, dentro do Bloco I-2000 do Centro de Tecnologia da UFRJ (SOTELO et al., 2010a, 2010b, 2011; STEPHAN et al., 2008).

Nessa etapa, as peças básicas precisavam ser integradas às partes de apoio, de modo que sua aplicação prática pudesse ser testada em uma simulação que reproduzisse o ambiente operacional de forma realista. Em se tratando de um trem de levitação magnética supercondutora, a equipe precisava ter o domínio da tecnologia SML de tal forma que todos os itens, por exemplo, trilhos, ímãs, nitrogênio líquido, criostatos, e a maquete do veículo pudessem ser integrados a um sistema. Para comprovar sua validação em ambiente relevante, o grau de fidelidade da tecnologia testada com o

protótipo funcional teria que ser significativamente maior do que os resultados verificados nos experimentos realizados no laboratório. Assim, os engenheiros construíram, no hangar do Bloco I-2000, um protótipo funcional capaz de levitar e se locomover sobre pista de 12 metros de trilhos, transportando pessoas em seu interior.

Nessa segunda parte do TDP, a construção do protótipo funcional compreendeu três vertentes de trabalho: uma para o sistema de física; a segunda para o sistema de tração; a terceira para o sistema mecânico. Para cada vertente, havia um grupo de professores, engenheiros, técnicos e alunos cuidando da aplicação prática da tecnologia no respectivo sistema.

O sistema de física, liderado pelo professor Rubens de Andrade Junior, concentrou os trabalhos em como implementar a SML nos trilhos do hangar do Bloco I-2000. Os estudos giravam em torno dos ímãs permanentes e da supercondutividade. Já os trabalhos sobre o sistema de tração envolveram uma série de pesquisas na área de Engenharia Elétrica, englobando estudos sobre tração linear, dirigidos pelo professor Antonio Carlos Ferreira, e sobre acionamento do motor linear, liderados pelo coordenador do projeto, professor Richard Magdalena Stephan. Além disso, os trabalhos foram supervisionados pelo técnico Ocione José Machado, que contribuiu de forma relevante na construção de ferramentas e métodos de montagem dos trilhos de ímãs (DIAS et al., 2009, 2008; MOTTA et al., 2008, 2013; SOTELO et al., 2010a, 2010b, 2011, 2013).

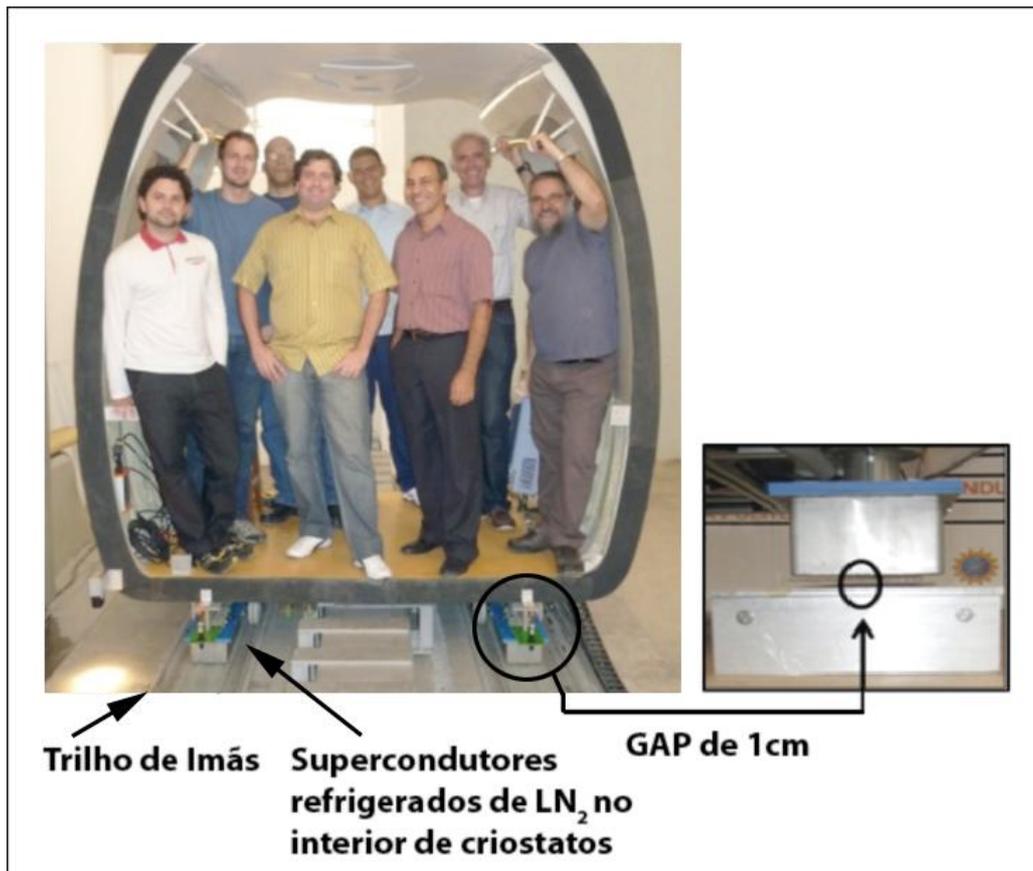


Figura 21 - Fotos de testes de validação do sistema de levitação magnética realizado no Lasup.

Fonte: Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

Para a concepção e construção do motor linear, a equipe do Lasup trabalhou em parceria com a empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. Enquanto os engenheiros do Lasup, liderados pelo professor Antonio Carlos Ferreira, desenvolveram estudos sobre tamanho, peso, posição e funções críticas do motor linear a ser acoplado ao módulo veicular, a Equacional, sob o comando do engenheiro Ivan Chabu, projetou e construiu o motor linear nas dimensões e características solicitadas pela equipe do Lasup.

Por fim, os trabalhos sobre o sistema mecânico veicular foram desenvolvidos a partir da parceria técnica entre a UFRJ e o INT. Como esses estudos consumiram mais tempo que o previsto no cronograma, a equipe do INT construiu uma maquete em escala real, feita de compensado de madeira e plástico, para que os engenheiros tivessem uma noção de como seriam as condições do espaço interno do módulo, com a disposição dos assentos e a distribuição do peso (MOTTA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015a, 2015b; SOTELO et al., 2011, 2012, 2013).

Com isso, a equipe do Lasup efetuou uma série de revisões dos requisitos do sistema, subsistemas e componentes que, conseqüentemente, acarretaram a revisão da definição do sistema. Para chegar a esse nível de amadurecimento, durante a Fase B, o TDP foi refinado por diversas vezes, tanto para abranger, na parte técnica, as alterações das especificações e requisitos do sistema, subsistemas e componentes, como para adaptar, na parte de gestão, as mudanças nas projeções de custos, riscos, cronograma de tempo e planos de metas de engenharia de sistemas.

A publicação em revistas indexadas dos resultados dos testes de desempenho, comprovando sua consistência com as previsões analíticas, a apresentação dos trabalhos em congresso e sua publicação em anais apresentam-se como potenciais evidências da trajetória evolutiva da tecnologia. Além disso, a documentação sobre a definição dos conceitos operacionais, a descrição do ambiente operacional para futuras aplicações e os relatórios dos testes que demonstram sua exequibilidade corroboram com os demais fatores que assinalam essa Fase B do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra.

Os membros da equipe do Lasup por nós entrevistados confirmaram que, na Fase B, os esforços foram concentrados na busca de soluções técnicas e economicamente viáveis para que o protótipo viesse a garantir não só a definição do conceito e dos requisitos de desempenho da tecnologia, como também a arquitetura e o *design* do sistema.

Embora o processo de TA não tenha sido definido nos moldes da métrica TRLs durante a Fase de Formulação do Projeto, o TDP foi suficientemente detalhado de modo a identificar as tecnologias críticas, em especial a SML, a estrutura dos sistemas, subsistemas e componentes, os sistemas herdados, os caminhos alternativos e os requisitos de desempenho, entre outros. Esse plano, ao lado dos planos de previsão de custos e de cronograma de tempo, complementaram o PPP e formaram a base de sustentação para a tomada de decisão pelo coordenador no KDP C, decidindo pela sua continuidade.

8.5 Fase C: projeto final e fabricação

A Fase C marca o início da implementação do projeto em escala de engenharia. Nessa fase, os engenheiros concentraram esforços nas atividades para a validação do protótipo do sistema em ambiente relevante e na finalização do projeto. A

Fase C começou com a realização dos testes no hangar do Bloco I-2000 e terminou com a construção da pista experimental, entre os CT 1 e CT2, e a fabricação do módulo e das partes, em preparação para a montagem e integração do sistema operacional.

Para a validação do sistema, os engenheiros realizaram, então, uma série de testes de simulação, demonstrando a capacidade do protótipo do sistema de levitar e se locomover sobre os trilhos construídos no hangar do Bloco I-2000. As atividades envolveram duas vertentes de trabalhos: uma para o sistema de física; outra para o sistema de tração.

Na primeira vertente, referente ao sistema de física, os engenheiros efetuaram testes e experimentos no campo da supercondutividade, envolvendo, por exemplo, estudos para medir a força dos ímãs e para dar vácuo ao criostato. Nessa Fase C, o desenvolvimento dos criostatos ainda era um elemento crítico do sistema. Como a equipe do Lasup buscava a validação do protótipo em escala real, precisava encontrar uma solução para a fabricação dos criostatos. Os engenheiros tentaram fazer um criostato no laboratório, mas não conseguiram ir adiante. Precisavam de mais recursos para as pesquisas.

Outra função crítica no desenvolvimento da tecnologia diz respeito aos ímãs. Embora possua matéria-prima suficiente, o Brasil não fabrica ímãs de neodímio. Assim, com os recursos da Faperj, os engenheiros planejaram, com certa antecedência, a importação dos ímãs em quantidade suficiente, capaz de garantir um estoque dessas peças para a fase seguinte do projeto. Uma pequena parte desse estoque foi, então, usada para a construção da linha de teste de 12 metros no hangar do Bloco I-2000, enquanto o restante ficou armazenado no Lasup para ser utilizado na construção da pista experimental do módulo operacional.



Figura 22 - Fotos de testes com nitrogênio líquido no hangar do Bloco I-2000 e com o criostato integrado ao módulo operacional estacionado no CT 1.

Fonte: Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

A segunda vertente dos trabalhos tratou do sistema de tração. A equipe promoveu testes com o motor linear projetado pelo engenheiro Ivan Chabu. Após os testes de desempenho, esse motor foi integrado ao sistema de engenharia física, proporcionando melhorias significativas ao sistema de levitação do veículo. Para driblar a força de atração que empurra o veículo para baixo, o motor do MagLev-Cobra tem um formato curvo, como a letra C, que favorece a levitação do módulo (DIAS et al., 2013; SOTELO et al., 2014).

Em razão da restrição de recursos financeiros e do cronograma de tempo, a equipe do Lasup decidiu utilizar a maquete construída pelo INT nos testes realizados para a demonstração do sistema de mecânica. Durante a realização dos testes de desempenho com o protótipo funcional em operação no hangar do Bloco I-2000, estudos sobre a automação do veículo começaram para criar um sistema de controle de velocidade e frenagem, assim como de abertura e fechamento das portas do módulo veicular.

A análise dos dados e categorização dos eventos ocorridos nessa Fase C, nos permite identificar algumas evidências que, em tese, podem indicar a trajetória evolutiva da tecnologia. A publicação dos resultados dos testes de desempenho em revistas científicas indexadas e em anais de congressos, a avaliação do projeto pelo Colegiado do Programa de Engenharia Elétrica e pelo Conselho Deliberativo da Coppe/UFRJ, além da aprovação do relatório de pesquisa pela Faperj, demonstram que o MagLev-Cobra passou pelo escrutínio de membros da comunidade científica e tecnológica. Embora essas avaliações não tenham seguido regras de padronização, nem

tenham sido aplicados métodos como os TRLs, não podemos deixar de reconhecer o rigor e a credibilidade dos pares.

Adicione-se, ainda, o fato de que o projeto final foi aprovado pelo BNDES, com a assinatura do convênio firmado com a Coppe/UFRJ em 15 de junho de 2012. A formalização do convênio ocorreu em evento promovido durante a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20), realizada no Rio de Janeiro de 13 a 24 de junho de 2012. Esse convênio possibilitou a construção da pista experimental do MagLev-Cobra entre os Centros de Tecnologia 1 e 2 da UFRJ e do módulo operacional.

Além dos recursos financeiros do BNDES e da Faperj, o projeto recebeu o apoio de empresas privadas, como OAS Engenharia S.A., Vallourec Tubos do Brasil S.A., Akzo Nobel N.V., WEG S.A., White Martins S.A., Equacional Elétrica e Mecânica Ltda. e Holos Brasil Serviço Naval Ltda. O objetivo principal consistia em garantir que o módulo veicular planejado fosse construído exatamente nas mesmas proporções, ou numa escala bem próxima, de um vagão de trem, como o do metrô ou do Veículo Leve sobre Trilhos (VLT), e pudesse levitar sobre uma pista experimental construída em área urbana.

A obra de engenharia civil e a contratação da mão de obra para a construção da pista experimental ficou sob a responsabilidade da empresa OAS Engenharia S.A, sendo a matéria-prima adquirida pela Coppe/UFRJ com recursos do BNDES. Para a estrutura metálica, a equipe do Lasup contou com o apoio da empresa Vallourec Tubos do Brasil S.A., que forneceu todas as partes em metal para a construção da pista: tubos, mãos-francesas, garras, grades, escadas, corrimões e demais peças para conexão e montagem dos trilhos. A tinta para o revestimento foi fornecida pela Akzo Nobel N.V. Já para o trabalho de cortar, montar, soldar e pintar as peças da estrutura metálica, a equipe do Lasup contratou a empresa Metalfenas Indústria da Construção Ltda.

No tocante à engenharia mecânica, a equipe do Lasup fez parceria com uma empresa incubada da Coppe/UFRJ, denominada Holos Brasil Serviço Naval Ltda. A partir do projeto de *design* do INT, os engenheiros da Holos realizaram estudos sobre a escolha do material da parte estrutural e mecânica do módulo veicular, promovendo testes de simulação e estudos sobre o dimensionamento da quantidade de fibra para a sua construção.



Figura 23 - Foto do módulo operacional do MagLev-Cobra no hangar do Bloco I-2000

Fonte: Cedida pelo Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

Nessa Fase C, os objetivos foram alcançados com o delineamento do projeto final do sistema, o detalhamento do projeto de engenharia civil, as plantas de arquitetura e as revisões de integração e do desempenho do sistema operacional. Ademais, as evidências mostram que os resultados dos testes de desempenho, com as avaliações e revisões realizadas ao longo dessa fase, deram ao coordenador a confiança necessária para a tomada de decisão no KDP D do ciclo de vida do projeto.

As entrevistas feitas com os membros da equipe e os documentos analisados mostram que, no fim dessa Fase C, as atividades realizadas pela equipe do Lasup culminaram com a fabricação de um módulo veicular, representativo de um trem de levitação magnética urbano em termos de formato, configuração e função do sistema operacional em escala de engenharia, além da construção da pista experimental entre o CT1 e CT2, em linha reta, com aproximadamente 200 metros de extensão, incluindo duas estações de embarque e desembarque de passageiros.

8.6 Fase D: montagem do sistema, integração, testes e demonstração técnica

A Fase D envolveu montagem do sistema, integração de todas as partes e a realização dos primeiros testes de desempenho com o modelo operacional, sendo concluída com a demonstração técnica do MagLev-Cobra, no dia 1º de outubro de 2014, durante a Conferência Internacional sobre Sistemas de Levitação Magnética e Motores Lineares – MAGLEV. Nessa fase, as atividades incluíam não só a montagem e integração, mas também a verificação e validação do sistema. Além disso, a equipe do Lasup se auto treinou no manuseio e funcionamento do módulo operacional para que pudesse sentir a máquina e familiarizar-se com a levitação magnética em escala operacional.

Em projetos de pesquisa e tecnologia, a Nasa (2013) entende que, ainda nessa fase, deve ocorrer o lançamento do produto. Porém, no caso do MagLev-Cobra, o lançamento foi planejado para ocorrer na fase seguinte, ou seja, na Fase E, com as atividades de operações. O motivo da transferência do lançamento para a Fase E se deve ao fato de que a equipe do Lasup pretendia, após a inauguração oficial, começar a operar regularmente. Com isso, preferiu-se, na Fase D, promover uma demonstração técnica do MagLev-Cobra aos especialistas nacionais e estrangeiros presentes na Conferência MAGLEV' 2014.

Destaque-se, contudo, que embora todas essas atividades tenham se concentrado na Fase D, o planejamento para que elas ocorressem com sucesso começou lá no início da Fase A. Essa Fase D é, portanto, uma síntese de tudo o que foi feito (e o que não foi possível ser feito), desde o PDP até sua concretização. Logo, a Fase D se encerrou com um sistema capaz de realizar os objetivos para os quais foi construído, ou seja, fazer que um módulo veicular levitasse e se locomovesse sobre pista experimental de cerca de 200m, em linha reta, entre o CT 1 e CT2.



Figura 24 - Fotos da apresentação do MagLev-Cobra na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT) / UFRJ, com a participação de alunos da Faetec, em 21 de outubro de 2015.

Fonte: Lasup/Coppe/Poli/UFRJ.

8.7 Fase E: lançamento, operações e manutenção do sistema

Essa é a fase em que se encontra o projeto no momento da feitura desta dissertação. O lançamento do MagLev-Cobra ocorreu em 2 de fevereiro de 2016, quando passou a operar regularmente, fazendo o trajeto entre o CT 1 e o CT 2, aberto ao público. Nas duas horas seguintes a seu lançamento, o MagLev-Cobra realizou 25 viagens, transportando cerca de 160 passageiros. Os testes operacionais, sempre abertos ao público, estão previstos para ocorrer durante todo o ano de 2016, todas as terças-feiras, nos horários das 11h às 12h e das 14h às 15h.

No tocante à manutenção do sistema, estão previstas e/ou em andamento atividades de aprimoramento operacional e de certificação da tecnologia. Na área operacional, as metas consistem em: **(a)** estabelecer procedimento de manutenção dos criostatos; **(b)** otimizar a linha de abastecimento de nitrogênio líquido; **(c)** substituir os blocos supercondutores por fitas supercondutoras; **(d)** incluir ciclo fechado de nitrogênio líquido; **(e)** fixar estratégias de tração linear, regeneração e armazenamento de energia. Além disso, os engenheiros estão elaborando o manual de operação e o de manutenção do sistema.

Paralelamente às operações e manutenção do sistema, a equipe do Lasup vem trabalhando na certificação do MagLev-Cobra, com ações relacionadas à sinalização de

segurança e acessibilidade, exigências de ergonomia, conforto e segurança, ao credenciamento do trem de levitação magnética para o transporte de passageiros e ao estudo de impacto ambiental dos materiais empregados na tecnologia.

O PET está desenvolvendo estudos para a introdução de elementos de sistemas de transporte inteligente (*intelligent transportation systems*– ITS) na linha experimental e a elaboração de plano para enquadrar o sistema MagLev-Cobra nas normas de automação de mobilidade de pessoas (*automated people mover* – APV). O PET está realizando também o levantamento do fluxo de passageiros com base no Plano Diretor de Transporte Urbano da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (PDTU/RMRJ), ao lado de estudos de implantação da tecnologia MagLev-Cobra na cidade do Rio de Janeiro.

As entrevistas por nós conduzidas no laboratório com os membros da equipe e os documentos analisados demonstram que a Coppe/UFRJ deu visibilidade pública ao projeto e tomou as medidas proativas necessárias para a divulgação dessa Fase E, o que pode ser notado com a aceitação e o interesse do público jovem pelo projeto. Essa visibilidade já rendeu ao MagLev-Cobra o reconhecimento da tecnologia pelos chineses, com a menção do projeto em dissertação de mestrado da Southwest Jiatong University, tendo o professor Richard Stephan participado da banca examinadora.

8.8 Fase F: término do projeto

Essa é a última fase do ciclo do projeto, o que ainda não ocorreu. Nessa Fase F, os engenheiros pretendem realizar o processamento e a análise dos dados de engenharia produzidos durante a Fase E. A equipe do Lasup deverá fazer uma avaliação do desempenho do sistema durante os testes operacionais e documentar quaisquer observações, anomalias e/ou lições apreendidas. Geralmente, nessa fase, ocorre uma avaliação da tecnologia por um time de especialistas independentes.

Essa Fase F representa o término do projeto. Ela pode ocorrer por diversos motivos, por exemplo, quando o projeto realiza os objetivos para os quais foi criado ou por falta de interesse das partes envolvidas, falhas, falta de recursos, ou também quando a tecnologia se torna economicamente inviável. Dependendo dos resultados alcançados, alguns projetos de inovação tecnológica nem chegam à Fase F, porque dão origem a

novos projetos, e a tecnologia nele desenvolvida se torna uma plataforma de conhecimentos para novos projetos de P&D.

Como até a presente data o projeto só conseguiu recursos para construir a pista experimental, a equipe do Lasup, com a Diretoria da Coppe e a Reitoria da UFRJ, vem buscando recursos para realizar um aprimoramento do MagLev-Cobra, mediante a implantação de uma linha de 5 km, interligando a Ilha do Fundão de ponta a ponta, facilitando, com isso, a mobilidade das pessoas que nela transitam.



Figura 25 - Imagem da Ilha do Fundão, com a planta da Cidade Universitária, projetada de acordo com o Plano Diretor da UFRJ 2016 – 2020.

Fonte: Plano Diretor da UFRJ 2016 – 2020, p. 101. Imagem cedida pelo Lasup/Coppe/UFRJ.

9 A TECNOLOGIA DO PROJETO MAGLEV-COBRA

Neste capítulo 9, ofereceremos um estudo sobre o ciclo de vida da tecnologia. Primeiro, efetuaremos uma breve exposição sobre a tecnologia SML, com a finalidade de enquadrar o projeto MagLev-Cobra como um projeto de inovação. Em seguida, faremos uma breve exposição sobre o ciclo de vida da tecnologia com base na Curva-S para observar os estágios de maturidade da tecnologia em relação ao método TRLs. Por fim, iremos aplicar o modelo do diagrama do ciclo de vida da tecnologia para enquadrar os quatro blocos de etapas da trajetória evolutiva do MagLev-Cobra, a fim de visualizar o processo de desenvolvimento da tecnologia.

9.1 O Maglev-Cobra como projeto de inovação tecnológica

Como alternativa de transporte voltado para a mobilidade urbana, MagLev-Cobra é um projeto de P&D, sendo considerado uma inovação tecnológica, de concepção genuinamente nacional, que objetiva a construção de um trem urbano de levitação magnética.

Essa tecnologia utiliza as propriedades diamagnéticas dos supercondutores de elevada temperatura crítica e do campo magnético produzido por ímãs de terras raras para obter a levitação. Por se tratar de trem urbano, os engenheiros do projeto MagLev-Cobra estão desenvolvendo um veículo capaz de se locomover em uma pista elevada, propulsionado por forças magnéticas, através de motor linear, movido a energia elétrica.

No caso do projeto MagLev-Cobra, a levitação empregada se baseia na propriedade diamagnética dos supercondutores, que exclui o campo magnético de seu interior. Em outras palavras, os supercondutores espelham campos magnéticos produzidos por ímãs em sua proximidade. Em um campo magnético com placas de ímãs, a polarização dos campos magnéticos ocorre quando os polos opostos se atraem e os idênticos se repelem. No fenômeno da levitação magnética, os supercondutores são blocos cerâmicos que funcionam como espelhos. Porém, esses blocos supercondutores não refletem imagens de objetos, mas sim os campos magnéticos presentes em sua proximidade, ou seja, um polo norte será refletido como norte, e um sul como sul.

Em razão da intensidade da força que produzem, as técnicas de levitação magnética vêm sendo empregadas para desenvolver sistemas de transporte de alta

velocidade, que permitem atingir velocidades acima de 450 km/h (quatrocentos e cinquenta quilômetros por hora), e representam uma alternativa competitiva para o transporte aéreo de média distância.

Como a tecnologia MagLev-Cobra emprega supercondutores classificados como do tipo II, a exclusão do campo magnético (diamagnetismo) é parcial, o que diminui a força de levitação, mas conduz à estabilidade da levitação em função do chamado efeito de *pinning*. Isso significa dizer que algumas linhas do campo magnético penetram no supercondutor como um feixe de cordas que possibilita o fenômeno da estabilidade. Essa propriedade diamagnética só pôde ser devidamente explorada a partir do fim do século XX, com o advento de novos materiais magnéticos, como o $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Nd-Fe-B), e de pastilhas supercondutoras de HTS, como o $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO). A SML começa agora a ser desenvolvida para o transporte urbano, e pode representar grande diferencial com relação a outros métodos de levitação – a EDL e a EML.

Ao desenvolver o projeto MagLev-Cobra, o Brasil passou a ser o primeiro país a possuir uma linha experimental, em escala-real, dessa tecnologia. Como projeto de inovação tecnológica, o MagLev-Cobra tem por objetivo construir um veículo de levitação magnética supercondutora, capaz de ser operado em vias elevadas ou sob o solo, a uma velocidade que pode variar entre 10 km/h e 70 km/h. Concebido para ser um trem urbano, o MagLev-Cobra foi desenvolvido a fim de atender às especificações do transporte público de passageiros em curtas distâncias e com paradas rápidas intercaladas, como as previstas para os trajetos casa-trabalho-casa. Por ter sido projetado com a intenção de buscar soluções para o transporte público, o MagLev-Cobra foi engendrado com articulações múltiplas, que o possibilitam efetuar curvas com pequenos raios de 50 metros, bem como subir e descer rampas com inclinações de até 15° de uma superfície plana.

Logo, o MagLev-Cobra pode vir a ser como solução alternativa para a crise de mobilidade dos grandes centros urbanos. Nesse sentido, o projeto atende aos aspectos econômico, ecológico e social, sendo comparativamente mais vantajoso que os sistemas atuais de roda-trilho e VLTs existentes no Brasil. Em outras palavras, caracteriza-se como uma proposta que contempla as exigências de um projeto sustentável.

Não se trata, portanto, de um projeto para competir com os trens de alta velocidade, nem para eliminar completamente o metrô ou o ônibus. É uma proposta

alternativa e, ao mesmo tempo, inovadora, sustentável e eficiente para os problemas estruturais do transporte público nas grandes cidades brasileiras.

9.2 O ciclo de vida da tecnologia

O ciclo de vida da tecnologia representado pela Curva-S resume os estágios de sua trajetória evolutiva. Como ferramenta utilizada no gerenciamento de projetos, a Curva-S traduz a teoria que reflete o acompanhamento do avanço tecnológico. Ela demonstra o alcance de um ou mais parâmetros-chave de desempenho de um produto ou processo com relação a um determinado período de tempo ou uma determinada quantidade de esforço de engenharia (BURGELMAN; CHRISTENSEN; WHEELWRIGHT, 2012).

Foster (1988, p. 30-31) tratou com maestria a Curva-S, mostrando com exemplos verídicos a relação entre o investimento gasto para melhorar um produto ou método e os resultados obtidos como retorno. Com isso, ele demonstrou que as tecnologias radicalmente novas são desenvolvidas para a indústria por empresas entrantes no mercado, e não pelas que já têm posição consolidada. Baseado no conceito da Curva-S, o autor provou que a perda de posições de liderança no mercado por empresas estabelecidas decorre, muitas vezes, do fato de insistirem em refinar tecnologias já maduras em vez de optar por novas oportunidades de inovação. Segundo o autor, essa opção de não buscar novas oportunidades de inovação está fundamentada na percepção de risco atrelado à tecnologia, em comparação à segurança de se manter os negócios já existentes (FOSTER, 1988, p. 106-107, 128-130).

Seguindo essa linha de raciocínio, a Curva-S é considerada valiosa para delinear a estratégia tecnológica no gerenciamento de um projeto de inovação (BURGELMAN; CHRISTENSEN; WHEELWRIGHT, 2012, p. 111-112). Isso ocorre porque as organizações que pretendem permanecer no mercado, ou mesmo aumentar sua participação, precisam alinhar seus negócios a uma estratégia tecnológica. A opção por novas oportunidades de inovação criou, então, uma trajetória de dependência¹⁶ (DOSI, 1982). Nesse sentido, a Curva-S descreve a trajetória de evolução de uma tecnologia que, por sua vez, delimita a trajetória de uma organização em busca da inovação.

¹⁶Dosi (1982, p. 151-156) utiliza as expressões *technological trajectories* e *path dependency*.

Como ferramenta analítica, a Curva-S da tecnologia é apresentada em um gráfico de valores acumulados. O eixo horizontal marca o esforço (investimento/tempo) e o vertical representa a quantidade acumulada de valores que registra o desempenho da tecnologia, em porcentagem. Ela tem o formato de uma curva logística e, geralmente, denota o avanço de uma tecnologia (BURGELMAN; CHRISTENSEN; WHEELWRIGHT, 2012; FOSTER, 1988).

A razão pela qual o ciclo de vida da tecnologia é caracterizado por uma Curva-S está no fato de que o aumento de seu desempenho não ocorreu na mesma velocidade ao longo de um determinado período de esforço (investimento/tempo). Em outras palavras, as taxas de desempenho da tecnologia verificadas nos estágios iniciais e finais de seu ciclo de vida são bem menores do que os percentuais marcados nos estágios intermediários. Além disso, as taxas de desempenho mostram que a tecnologia atinge um limite natural ou físico nos estágios intermediários de sua trajetória evolutiva (FOSTER, 1988).

Ao ser analisada como uma representação gráfica do avanço tecnológico, a Curva-S apresenta-se como uma curva sinuosa no formato de um S, alongado nas extremidades. A base é à esquerda, e o topo da curva, à direita, conforme demonstra o Gráfico 2.

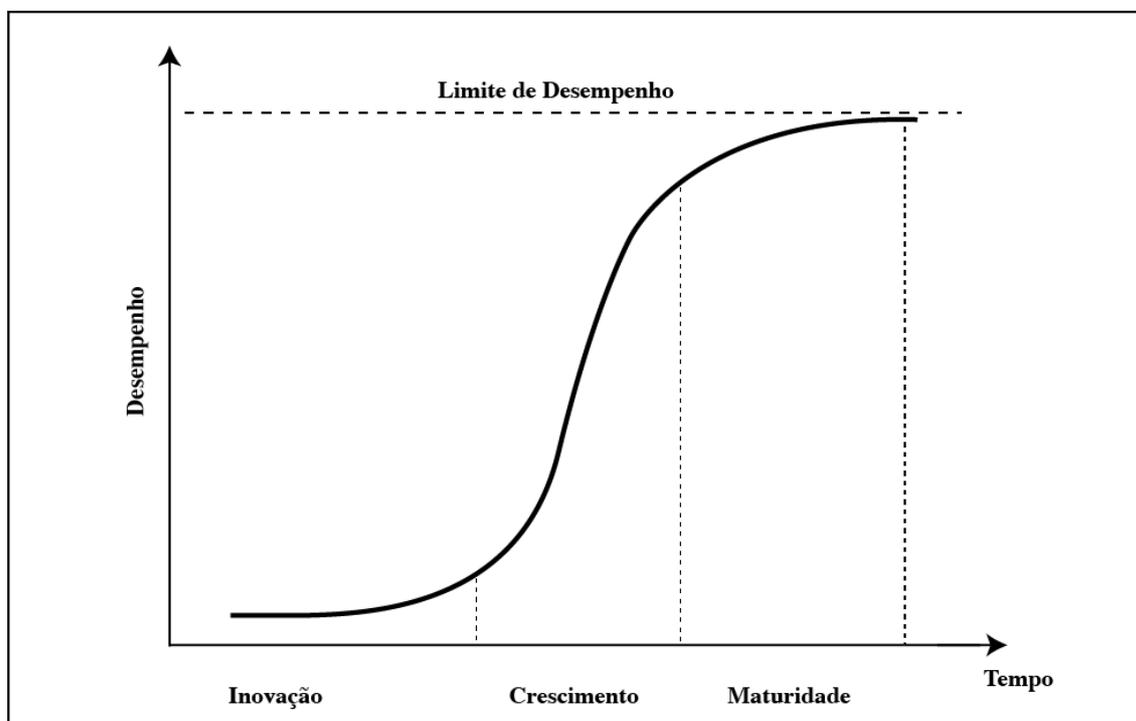


Gráfico 2 - Curva-S da tecnologia.

Fonte: Gráfico adaptado (FOSTER, 1988, p. 31; ZAWISLAK et al., 2008).

O Gráfico 2 apresenta a Curva-S da tecnologia que descreve a trajetória evolutiva de uma tecnologia em seus três estágios-chave: inovação, crescimento e maturidade. O eixo vertical marca o desempenho da tecnologia, enquanto o eixo horizontal registra o tempo. O primeiro estágio reflete a inovação schumpeteriana, que promove as ondas de destruição criativa. O segundo estágio denota o desenvolvimento da tecnologia, sinalizado pelo ponto de inflexão da Curva-S. Nesse estágio, o domínio da tecnologia gera maior capacidade de evolução tecnológica, assinalada pela trajetória vertiginosa da curva. No terceiro estágio, a tecnologia atinge o limite de seu desempenho. Ela se encontra no estado de maturidade plena, e o empreendedor deve enfrentar as mudanças e optar por novas oportunidades de inovação para que sua organização possa manter a posição no mercado ou progredir (ZAWISLAK et al., 2008, p. 4-5).

Nolte (2008) faz uma analogia entre o ciclo de vida de um sistema biológico e o de uma tecnologia. Para ele, a trajetória evolutiva da tecnologia possui o formato do contorno do corpo de uma baleia. Ela se inicia com uma ideia, partindo da esquerda do gráfico, marcado pelo rabo do mamífero, sem a cauda. Em seguida, vai contornando o dorso da baleia, representado por sua trajetória evolutiva, e termina com o formato de sua cabeça, cuja curvatura retrata a obsolescência e, por fim, a morte da tecnologia. Segundo o autor e criador da calculadora AFRL TRLs, o ciclo de vida da tecnologia tem, portanto, nove estágios: concepção, nascimento, infância, adolescência, maioridade, maturidade, envelhecimento, senilidade e morte, representados conforme o Gráfico 3 abaixo.

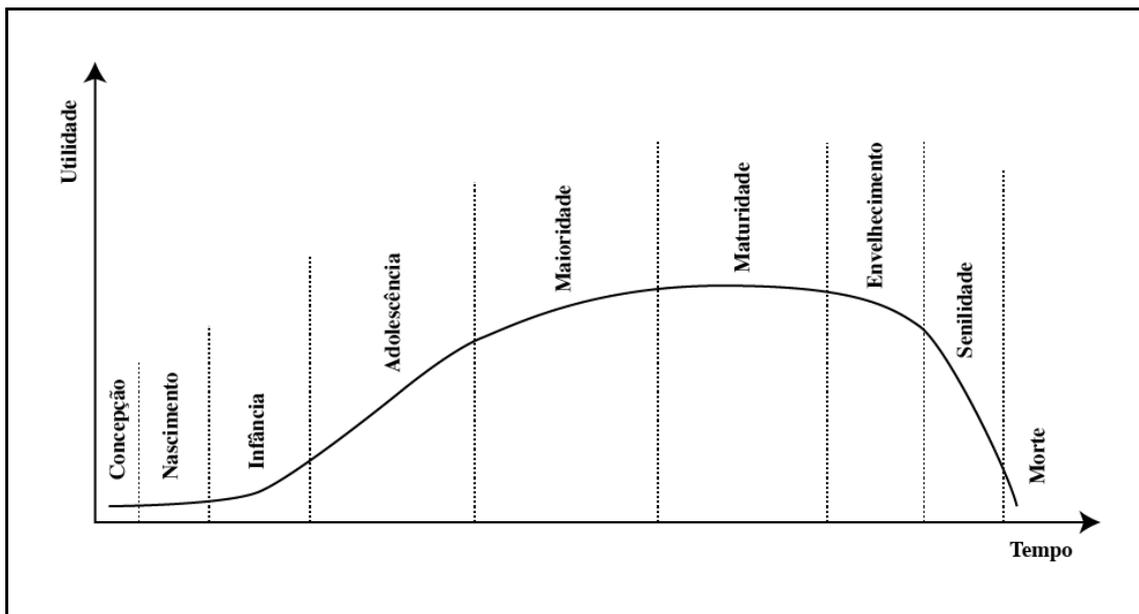


Gráfico 3 - O ciclo de vida da tecnologia em nove estágios.

Fonte: Traduzido e adaptado pela pesquisadora (NOLTE, 2008, p. 24).

No Gráfico 3, o eixo horizontal marca a passagem do tempo, e o vertical registra a utilidade da tecnologia. Ele mostra a quantidade de utilidade da tecnologia presente em um ponto determinado no tempo. À medida que a trajetória da tecnologia evolui, o gráfico mostra que a utilidade cresce por um período de tempo, depois nivela antes de começar a declinar, chegar à obsolescência e, por fim, à morte (NOLTE, 2008, p. 24). Durante o estágio de concepção, a trajetória evolutiva da tecnologia é lenta, e o valor de sua utilidade é considerado ainda pequeno. A utilidade só começa a crescer no início do estágio de adolescência (NOLTE, 2008, p. 20-22).

Esse estágio é um grande acontecimento na vida de uma tecnologia, porque marca a transição da pesquisa científica e aplicada no ambiente de laboratório para um ambiente centrado no produto. Nos estágios intermediários da adolescência e maioridade, o tempo é curto, mas o valor da utilidade da tecnologia aumenta rapidamente. Porém, esse rápido crescimento atinge seu limite e se estabiliza durante os estágios de maturidade e envelhecimento, até se tornar obsoleta e ser substituída por uma nova tecnologia (NOLTE, 2008, p. 21-24).

9.3 As abordagens do ciclo de vida da tecnologia

Quando observamos os dois gráficos, podemos perceber que, apesar do eixo horizontal marcar a passagem do tempo em ambos, no primeiro, o eixo vertical registra

o desempenho; no segundo, a utilidade da tecnologia. O primeiro gráfico está fundamentado na teoria da curva sigmoide ou logística. Já o segundo é representado por um diagrama.

Isso significa dizer que os gráficos não devem ser comparados, pois empregam variáveis distintas. Existem diferentes abordagens para avaliar o ciclo de vida da tecnologia, e nenhuma delas pode ser considerada mais completa ou melhor que a outra. Não existe regra. Porém, uma análise mais profunda dos gráficos nos leva à conclusão de que ambas as abordagens são muito similares. A diferença está, portanto, na ênfase dada aos aspectos da tecnologia que se pretende medir.

Em outras palavras, a abordagem para a avaliação do ciclo de vida da tecnologia depende de aspectos relacionados ao resultado que se pretende alcançar ou à ênfase que se pretende dar aos diferentes aspectos do ciclo de vida da tecnologia. Por um lado, uma tecnologia pode ser de grande utilidade, mas ter um desempenho regular. Por outro, uma tecnologia pode ter excelente desempenho, mas ser de pouca utilidade. A abordagem vai, portanto, determinar o ciclo de vida da tecnologia. Em adição, a abordagem pode variar, por exemplo, quanto ao desenvolvimento, à aquisição da tecnologia, à disponibilidade de matéria-prima ou aos aspectos de *marketing* do produto. No caso do MagLev-Cobra, por exemplo, o *kit* dos criostatos foi adquirido de uma empresa alemã, e os ímãs de terras raras importados da China.

9.4 O ciclo de vida da tecnologia e os TRLs

Os níveis de prontidão de tecnologia não se confundem com o estágio de maturidade descrito em seu ciclo de vida. Note-se que o estágio de maturidade marcado nos Gráficos 2 e 3 demonstra que a tecnologia atingiu seu limite natural ou físico, seja de desempenho, seja de utilidade.

Independentemente da abordagem que se adote para avaliar o ciclo de vida da tecnologia, esse estágio de maturidade demonstra que o mercado chegou ao ponto de saturação e não está mais crescendo. A competição fica arrefecida, e os fornecedores da tecnologia tentam atrair os consumidores com modelos novos ou versões aprimoradas. Geralmente, essas novas características adicionadas ao produto não possuem qualquer relação com a aplicação da tecnologia na forma para a qual ela foi originariamente criada (NOLTE, 2008).

Diferentemente do estágio de maturidade no ciclo de vida da tecnologia, a métrica TRLs traduz a prontidão da tecnologia, identificando o que foi feito e em que condições ela se encontra durante seu processo de desenvolvimento. Como métrica de avaliação, os TRLs são como espelhos retrovisores que possibilitam a engenheiros e demais interessados olhar para a tecnologia em determinado ponto no tempo, identificando em que nível ela se encontra com relação ao estado da arte, antes de decidirem avançar em seu desenvolvimento.

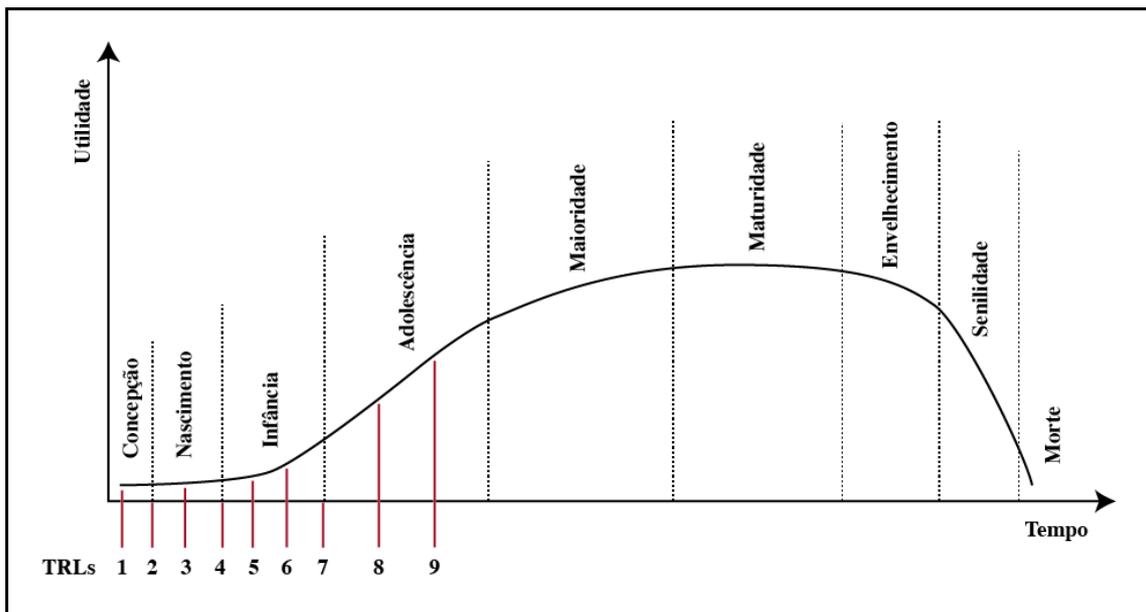


Gráfico 4 - Diagrama do ciclo de vida de uma tecnologia com os TRLs.

Fonte: Traduzido e adaptado (NOLTE, 2008, p. 55).

Assim, se analisarmos o ciclo de vida da tecnologia com relação aos TRLs, podemos notar que todos os nove níveis de prontidão ocorrem na primeira fase da Curva-S (FOSTER, 1986), nos estágios de inovação e crescimento, sob a abordagem do desempenho. Na perspectiva de Nolte (2008), ocorre nas primeiras fases do diagrama da baleia, compreendendo os estágios de concepção, nascimento, infância e o início da adolescência, sob a abordagem da utilidade. Isso ocorre porque, ao ser incorporada em um produto, utilizada em operações em missão bem-sucedida ou, ainda, colocada no mercado para desempenhar a finalidade para a qual foi concebida, a tecnologia atingiu o último nível de prontidão, isto é, TRL 9. O nível marca o fim do desenvolvimento da tecnologia na escala TRLs. Porém, esse não é o último estágio do ciclo de vida da tecnologia.

Sob o ponto de vista das abordagens acima, o nível TRL 9 geralmente ocorre durante o estágio de adolescência do ciclo de vida da tecnologia, podendo, contudo, ocorrer antes, no estágio de infância. Nesses casos, a linha divisória para a aplicação do método dos níveis de prontidão é marcada pelo estágio da maioridade. A partir desse ponto, a tecnologia foi integrada ao produto com sucesso, que passou a ter a preferência no mercado. Não se fala mais em desenvolvimento da tecnologia. Nesse estágio de forte competição, o preço, a marca e a posição da organização no mercado são fatores mais importantes do que a utilidade ou o desempenho da tecnologia (NOLTE, 2008).

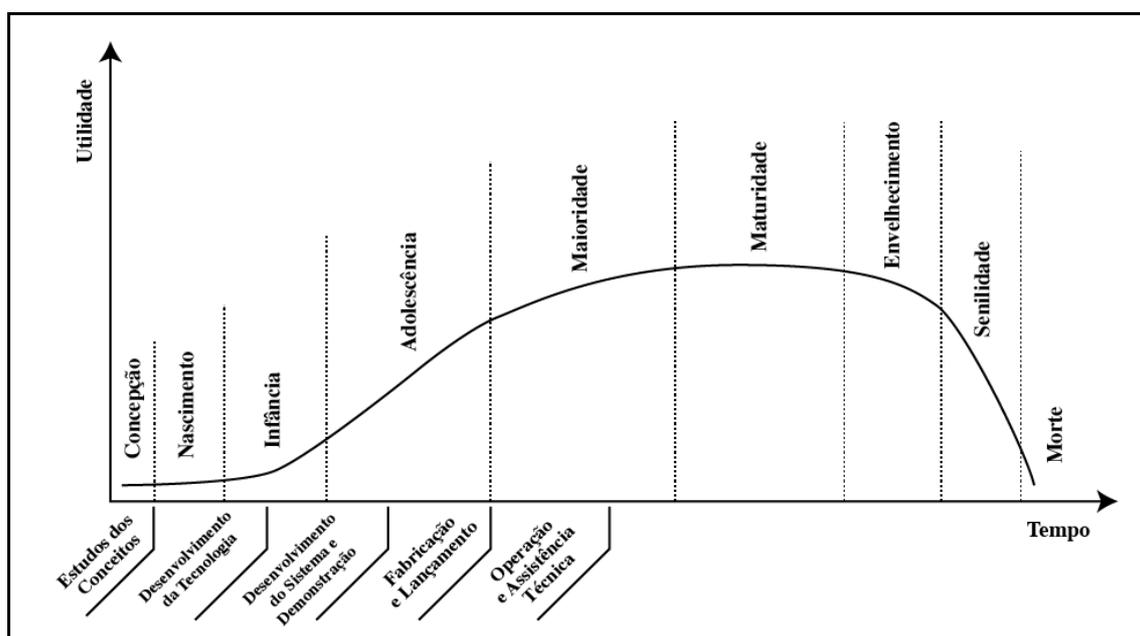


Gráfico 5 - Diagrama do ciclo de vida de uma tecnologia com as fases do ciclo de vida do projeto.

Fonte: Adaptada (UNITED STATES, 2011; NOLTE, 2008).

Como o Brasil é um país que adquire mais tecnologia pronta do que a desenvolve, seu ciclo de vida possui características distintas, que devem ser consideradas por uma organização ao delinear sua estratégia tecnológica. O processo de aquisição de tecnologia concentra mais esforços na fase de engenharia do que na fase de desenvolvimento da tecnologia. Os estágios de concepção, nascimento, infância e parte da adolescência no ciclo de vida da tecnologia serão realizados pela organização que a desenvolveu, detentora da titularidade dos direitos autorais. O processo de aquisição pela organização adquirente da tecnologia somente se inicia no fim do estágio de adolescência ou início da maioridade no ciclo de vida, após a conclusão da fase de desenvolvimento da tecnologia.

Em outras palavras, a estratégia da organização adquirente da tecnologia deve ser direcionada para as fases de fabricação, montagem, integração do sistema e lançamento do produto. Essa estratégia, entretanto, tem uma desvantagem – grande parte dos custos incorre na fase de operações e manutenção (Fase E) do ciclo de vida do projeto, após o lançamento do produto, o que geralmente ocorre no estágio de maturidade do ciclo de vida da tecnologia, quando atingiu seu limite natural ou físico. E isso acarreta diminuição nas margens de lucro.

9.5 As etapas do Maglev-Cobra e o diagrama do ciclo de vida da tecnologia

Partindo da linha de tempo do MagLev-Cobra, delineada no Quadro 6 do capítulo 7, projetamos, a título ilustrativo, os quatro blocos das etapas do projeto no diagrama do ciclo de vida da tecnologia, conforme concebido por Nolte (2008).

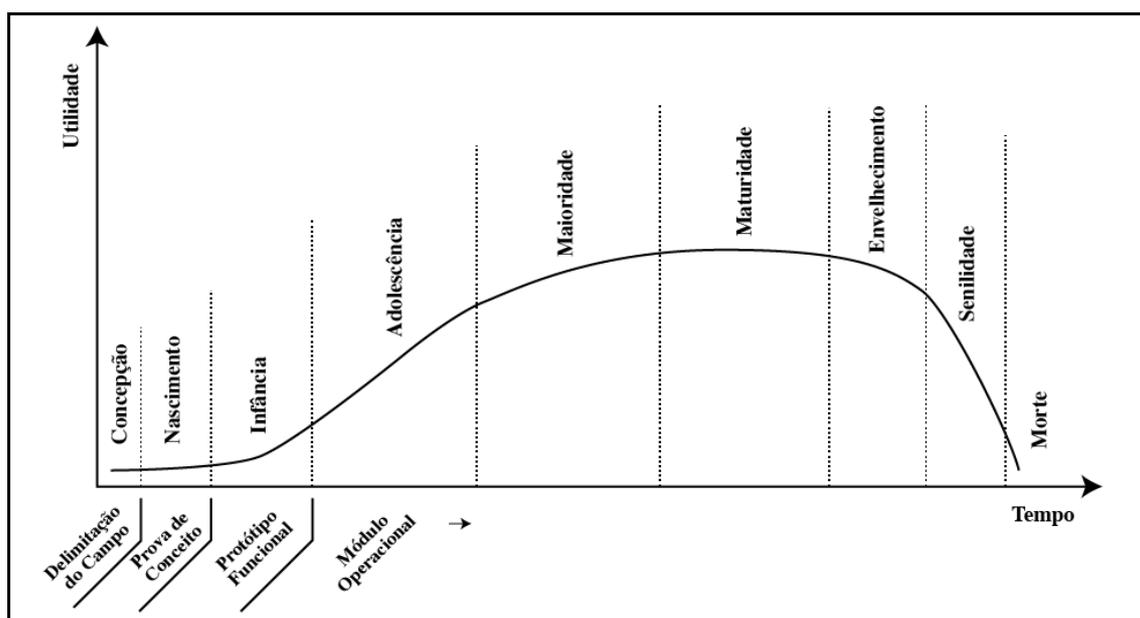


Gráfico 6 - As etapas do projeto MagLev-Cobra e o diagrama do ciclo de vida da tecnologia.

Fonte: Adaptada pela pesquisadora (NOLTE, 2008, p. 24).

No estágio de concepção da tecnologia, ocorreu a etapa de delimitação do campo de pesquisa, na qual os conceitos científicos foram observados e formulados em um ambiente acadêmico. Da observação dos conceitos científicos no campo da levitação magnética, os engenheiros ergueram a base para a viabilidade da tecnologia. No estágio de nascimento, iniciou-se o desenvolvimento do conceito e da tecnologia. Esse estágio é

caracterizado pela etapa da prova de conceito, com a validação de componentes e subsistemas por meio da realização de testes de simulação com uma maquete no ambiente do laboratório.

O passo seguinte trilhou em direção ao estágio da infância, que envolveu a etapa do protótipo funcional. Nessa etapa, a trajetória de evolução da tecnologia passou pela validação e demonstração do protótipo funcional no hangar do Bloco I-2000. Em continuação, no estágio de adolescência do ciclo de vida da tecnologia, se verifica a etapa do módulo operacional, com a construção e demonstração técnica do módulo veicular na pista de teste entre o CT1 e o CT2. Atualmente, o projeto caminha para dar os primeiros passos em direção aos testes operacionais.

Os blocos de etapas do projeto devem, contudo, ser analisados sob o enfoque do Gráfico 6, tendo em vista o estado da arte em que se encontra a tecnologia atualmente. Isso significa dizer que o ciclo de vida do MagLev-Cobra, apresentado no Quadro 8, deve ser entendido como uma representação da trajetória evolutiva da tecnologia, desde os estudos dos conceitos de levitação magnética, realizados na Pré-fase A, até a Fase E, de operações e manutenção do módulo operacional e da pista experimental entre o CT 1 e o CT 2, ou seja, no estágio em que se encontra a tecnologia neste ano de 2016.

10 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

10.1 Conclusão

Projetos de P&D, geralmente, possuem uma abordagem de gestão direcionada para o controle de custos, riscos e cronograma de tempo. Os gerentes de projetos e suas equipes se vêem, muitas vezes, obrigados a moldar metas de desempenho para ajustá-los às exigências e aos prazos impostos por legislações e políticas públicas restritivas, bem como às disponibilidades de recursos das agências de fomento ou dos investidores e parceiros interessados. Essa abordagem de gestão é determinada por um padrão estruturado de planejamento, execução e controle do projeto que impõe limitações orçamentárias e, conseqüentemente, dificulta o desenvolvimento da tecnologia.

Esse padrão decorre de um mito que ainda perdura na gestão de projetos de P&D. O mito está relacionado à crença de que todos os projetos têm um formato idêntico, e as ferramentas e os métodos de gestão podem ser utilizados em qualquer um deles, independentemente de suas características. Nosso mapeamento sistemático da bibliografia nos mostrou que a maioria dos livros e artigos científicos propõe métodos que tratam todos os projetos de forma similar, indicando que o sucesso pode ser alcançado mediante o emprego de um conjunto padrão de ferramentas e técnicas de gestão.

Entretanto, fatores como a competição global e a cooperação entre instituições de pesquisa, assim como a necessidade do nosso País de promover o desenvolvimento tecnológico, vêm exigindo dos gestores um novo olhar sobre a forma de realizar projetos de P&D. A nova abordagem sai do padrão comumente aceito e aplicado pela maioria das organizações que costumam implantar um processo de gestão, fundamentado no conceito clássico de que um modelo único serve para todos os projetos. Esse novo olhar precisa dar ao projeto P&D um caráter estratégico e uma dimensão mais dinâmica.

Nesse contexto, os gerentes de projetos devem deixar de ser administradores do caixa e se tornarem verdadeiros empreendedores, capazes de tratar da gestão estratégica do projeto, em todas as suas dimensões, especialmente na tecnológica, assumindo uma posição de liderança sobre o projeto como um todo.

Nessa linha de raciocínio, os gerentes empreendedores devem abandonar a abordagem clássica de gestão e buscar soluções no campo da engenharia de sistemas, abrangendo áreas interdisciplinares para alcançar os objetivos de inovação tecnológica traçados para os projetos. Com isso, poderão escolher a melhor estratégia para o projeto e, conseqüentemente, ter a liberdade de determinar a abordagem de gestão, tomando decisões sobre o que, como e quando gastar os recursos ao longo do ciclo de vida do projeto.

Assim, uma vez concedidos os recursos, a gestão sai da abordagem padrão imposta pelas políticas públicas e passa a ser delineada pelo gerente empreendedor, de acordo com as características do projeto. No âmbito das organizações privadas, com essa nova abordagem de gestão, o gerente empreendedor deixa de ser apenas o administrador do projeto para dividir a responsabilidade pelos resultados dos negócios. Já no âmbito das organizações públicas, isso significa que o gerente empreendedor acrescenta, a seus deveres de agente público, a responsabilidade pela criação de valor para o bem público e a obrigação de prestar contas ao contribuinte, zelando sempre pela ética e pelo interesse do Estado.

Como vimos nos capítulos 3 e 4, a Nasa tem conduzido diversos projetos com diferentes abordagens de gestão ao longo de sua vasta experiência no gerenciamento de projetos de pesquisa e tecnologia espaciais. Porém, a partir de seu plano estratégico de investimento tecnológico, vem estabelecendo políticas para traçar uma estrutura voltada para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Durante a feitura desta dissertação, algumas normas e diretrizes podem ter sido atualizadas. Trabalhamos, contudo, com as versões mais recentes a que tivemos acesso na época. O “Manual de engenharia de sistemas” (SP-2007-6105), bem como os requisitos procedimentais NPR 7120.8, de 5 de fevereiro de 2008, e o NPR 7123.1B, de 18 de abril de 2013, dentre outros, estabelecem processos para a formulação, aprovação e implementação de projetos. Essas diretrizes traçam categorizações de eventos, descrevem processos e fixam marcos para as tomadas de decisões pela gerência durante a realização do projeto.

Embora sejam utilizados há mais de 25 anos, os TRLs foram adotados como ferramenta pertencente à estrutura oficial de todos os centros, escritórios e departamentos da Nasa, sendo sua aplicação mandatória, mas não exclusiva. Além de

estar previsto nas normas de procedimentos da Nasa, ele é adotado por universidades, institutos de pesquisa, organizações públicas e privadas ao redor do mundo.

Como nosso objetivo se circunscreveu à gestão da inovação tecnológica em um projeto de P&D, buscamos, então, mapear o amadurecimento da tecnologia no projeto MagLev-Cobra, desenvolvido no ambiente da Coppe/UFRJ, em face à realidade de nosso País. Para tanto, utilizamos o método TRLs como referência para identificar a trajetória evolutiva da tecnologia ao longo do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra, desde sua formulação até a fase em que se encontra no fechamento desta dissertação.

Nossas primeiras observações e nossos achados sugerem que a maioria dos membros da equipe do Lasup não distinguem o projeto MagLev-Cobra dos demais projetos da Coppe/UFRJ, com relação a sua gestão como um projeto de inovação tecnológica. A classificação dos projetos na Coppe/UFRJ está relacionada tanto ao tipo de projeto, se de pesquisa ou consultoria, como à captação de recursos financeiros, por convênio, mediante o ingresso na conta única da universidade, ou por meio de contrato, com a interveniência de uma fundação de apoio. Esse modo de classificar a gestão, com base no tipo de projeto e na captação dos recursos financeiros, não é exclusivo da equipe do Lasup, mas traduz sim um procedimento institucionalizado a partir das políticas públicas e das legislações que regulam as relações entre as universidades públicas federais e as agências de fomento, as empresas e/ou as instituições sem fins lucrativos.

Essa investigação revelou, ainda, que pesquisadores e engenheiros que trabalham no projeto MagLev-Cobra não têm plena consciência da singularidade do produto que estão construindo. Isso não decorre somente das incertezas geradas pelo desafio diário de produzir tecnologia de ponta, mas sim da cultura de nosso País, que não tem como prioridade de política pública o desenvolvimento tecnológico. Projetos de inovação tecnológica como o MagLev-Cobra são raramente repetidos e, por isso, são quase sempre únicos para o país ou, quiçá, para o mundo. Nossa conclusão é a de que a maioria dos projetos de inovação tecnológica ou são plataformas de conhecimento para futuros projetos, ou são genuinamente inovadores e, portanto, necessitam de procedimentos de gestão que atendam a suas características.

Embora a estratégia de gestão do MagLev-Cobra seja voltada para captação e administração dos recursos, o mapeamento das fases do ciclo de vida do projeto revelou que o modo pelo qual uma tecnologia é desenvolvida em um projeto de P&D impacta

sua gestão. A aplicação heterodoxa do método TRLs nos permitiu identificar possíveis evidências da trajetória evolutiva da tecnologia em cada uma das fases do ciclo de vida do projeto.

Além disso, a análise dos dados e a categorização dos eventos, com base no método TRLs, possibilitaram a identificação dos marcos e dos pontos-chave utilizados pelo coordenador na tomada de decisão para avançar de uma fase para a seguinte do projeto. A pesquisa também propiciou o delineamento da linha do tempo do projeto do MagLev-Cobra, agrupado em quatro blocos de etapas. Com base no diagrama de Nolte (2008), verificamos que esses blocos estão situados no início do ciclo de vida da tecnologia. Essas evidências confirmam, portanto, o entendimento de que quanto menos desenvolvida a tecnologia, maior é o nível de incerteza contido em seu processo de amadurecimento, e mais imprevisível é sua trajetória evolutiva.

Em um típico projeto de P&D, gerido sob a abordagem de uma estratégia tecnológica, os nove níveis de TRLs podem ser agrupados em quatro blocos de etapas do projeto, baseados na relação entre o desenvolvimento da tecnologia e o *design* do produto. Como mencionamos no capítulo 5, se as tecnologias estão em TRL 1, TRL 2 e TRL 3, são muito imaturas para se pensar em utilizá-las no *design* do produto. Nos três primeiros níveis de TRLs, as tecnologias estão nos estágios de concepção e nascimento em seu ciclo de vida. O grau de incerteza é alto. O projeto está, então, na Pré-fase A e na Fase A, e sua estratégia deve ser a de avançar a tecnologia para o nível seguinte de prontidão, o TRL 4. Nesse primeiro bloco de etapas, o plano de definição do projeto é delineado paralelamente ao plano de desenvolvimento da tecnologia.

As tecnologias que se encontram nos níveis TRL 4 e TRL 5 estão em um grau intermediário de amadurecimento, o estágio da infância em seu ciclo de vida. O projeto está na Fase B, e o foco principal de sua estratégia deve ser a conclusão do desenvolvimento da tecnologia. Esse segundo bloco de etapas é marcado pela definição do sistema e o início do *design* do produto. Ele encerra o período de formulação do projeto. Tem-se, portanto, o PPP, que deve ser submetido à aprovação das partes interessadas.

TRL 6 e TRL 7 são considerados pontos críticos no amadurecimento das tecnologias e, dependendo da abordagem de gestão, um ou outro nível terá maior influência sobre o rumo do projeto. Na gestão baseada em uma estratégia tecnológica, TRL 6 é um nível crítico no desenvolvimento das tecnologias, porque abrange a

demonstração do protótipo do sistema em um ambiente relevante. As tecnologias estão encerrando o estágio de infância em seu ciclo de vida. O projeto está, então, na Fase C, e o objetivo deve ser seu delineamento final. Geralmente, essa Fase C envolve a construção de diversos protótipos que permitem não só os ajustes necessários em cada uma das tecnologias utilizadas, mas também sua integração como sistema.

Já na gestão baseada em uma estratégia do *design* do produto, TRL 7 é visto como um nível crítico, porque representa a demonstração do protótipo do sistema em um ambiente operacional. As tecnologias estão, portanto, iniciando o estágio de adolescência em seu ciclo de vida. O projeto está na Fase D, e a ênfase é dada à montagem do sistema, integração das partes e realização de testes de funcionamento. Esse terceiro bloco de etapas marca a primeira metade do período de implementação do projeto. No fim, o produto deverá estar concluído e poderá ser lançado.

TRL 8 e TRL 9 são os dois últimos níveis de amadurecimento da tecnologia, que abrangem o processo de operações e manutenção do sistema. As tecnologias nesses níveis de amadurecimento estão em estágio avançado de adolescência. O TRL 8 representa a qualificação da tecnologia, antes do produto ser liberado para produção. O projeto está na Fase E, na qual se busca comprovar a capacitação da tecnologia, mediante testes operacionais. Já o TRL 9 caracteriza-se como a garantia de operabilidade do sistema. O projeto chega, então, a seu fim com a Fase F, na qual se atinge o amadurecimento das tecnologias. Esse quarto e último bloco de etapas encerra o período de implementação do projeto.

No caso do MagLev-Cobra, como a abordagem de gestão está voltada para a captação de recursos, os quatro blocos de etapas do projeto foram agrupados, tendo em vista a entrada de recursos financeiros. No primeiro bloco de etapas, denominado de delimitação do campo, os recursos permitiram somente a realização da Pré-fase A do projeto, marcada pelos estudos dos conceitos. Nessa Pré-fase A, identificamos potenciais evidências que podem caracterizar o amadurecimento da tecnologia no TRL 1. Já o segundo bloco de etapas, chamado de prova de conceito, os recursos permitiram a conclusão dos estudos dos conceitos e o início do desenvolvimento da tecnologia. Esse segundo bloco de etapas abrangeu a Fase A do ciclo de vida do projeto, no qual foram apontadas evidências, em tese, do amadurecimento da tecnologia nos níveis TRL 2 e TRL 3.

A razão pela qual a Pré-fase A e a Fase A terem sido realizadas em blocos distintos se deve ao fato de que cada etapa do projeto foi planejada isoladamente, de acordo com os limites dos recursos concedidos pelas agências de fomento. No fim do segundo bloco de etapas, o PDP previa a construção de um trem de levitação magnética supercondutora de alta velocidade.

A transição entre o segundo e o terceiro bloco de etapas foi marcado por uma interrupção no ciclo de vida do projeto, retardando a trajetória evolutiva da tecnologia devido às dificuldades em se obter recursos para prosseguir com as pesquisas. No ano de 2007, o Lasup só não fechou as portas porque foi constituído dentro da estrutura de um instituto de tecnologia, no ambiente de uma universidade pública federal.

O terceiro bloco de etapas, conhecido como protótipo funcional, incluiu a Fase B e parte da Fase C do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra. Como, nesse segundo bloco de etapas, o projeto contou com recursos concedidos essencialmente pela Faperj, a validação e a demonstração do protótipo em ambiente relevante foram planejadas para a construção de um trem de levitação magnética urbano, atendendo aos requisitos do transporte público no Estado do Rio de Janeiro. O projeto final previa a construção de uma pista de teste de 5 km, bem como de um trem de levitação magnética com articulações múltiplas, capaz de percorrer trajetos com curvas com raios de 50 metros e aclives de até 15° de uma superfície plana.

O quarto e último bloco de etapas, intitulado módulo operacional, englobou parte da Fase C, bem como as Fases D e E do ciclo de vida do projeto MagLev-Cobra. A razão pela qual a Fase C foi desmembrada entre o terceiro e o quarto bloco de etapas está na abordagem de gestão do projeto, centrada na disponibilidade de recursos. O atraso no cronograma de execução da obra fez a etapa de fabricação prevista na Fase C avançar sobre a Fase D, postergando a montagem do sistema e a integração das partes.

Os recursos recebidos da Faperj e do BNDES para as Fases C e D, além do apoio de empresas parceiras, redefiniram o escopo do projeto. Em vez de construir uma linha de teste de 5 km e um veículo com articulações múltiplas, a equipe do Lasup precisou refinar o projeto final, vindo a construir uma pista experimental de cerca de 200 metros entre o CT 1 e o CT 2 e um módulo operacional. Nessa Fase D, a demonstração do módulo operacional na pista experimental para os especialistas nacionais e estrangeiros, durante a conferência internacional MAGLEV' 2014, apresenta-se como evidência da trajetória evolutiva do projeto. Atualmente, ele se

encontra na Fase E, com o lançamento do sistema MagLev-Cobra e o início das operações abertas ao público.

Isso ocorre porque a abordagem de gestão, objetivando a obtenção de recursos para cada etapa do projeto isoladamente impõe ao desenvolvimento da tecnologia um grau de incertezas muito elevado. Com isso, o gerente empreendedor é obrigado a redefinir a arquitetura do sistema e os requisitos para a sua aplicação, bem como o ambiente operacional final. Essa abordagem padrão de gestão afeta diretamente os resultados do projeto e compromete o desenvolvimento da tecnologia, pois exige que os engenheiros alterem constantemente a estrutura do projeto e lidem com contingências que não foram planejadas. Por conseguinte, as diversas redefinições do projeto geralmente acarretam aumento de custos, cronograma de tempo e, muitas vezes, de riscos associados à tecnologia.

Desenvolver tecnologia em nosso País requer do engenheiro um esforço maior do que o esforço intelectual para avançar as pesquisas científicas e tecnológicas no campo do conhecimento desconhecido ou para enfrentar as incertezas imprevisíveis do processo de inovação. A gestão de projeto de P&D exige do engenheiro estar preparado para lidar com o caos e se sentir confortável em administrar um conjunto infinito de incertezas no seu dia a dia de trabalho.

Podemos, portanto, inferir que os TRLs podem ser utilizados como ferramenta útil de gerenciamento para avaliar o desempenho da tecnologia durante sua trajetória evolutiva, seja no início, no meio ou no fim do ciclo de vida do projeto. Todavia, como métrica de avaliação da maturidade da tecnologia, o método TRLs foi criado para ser aplicado no início do projeto para que seja traçada uma linha de base da maturidade da tecnologia. A partir dessa linha de base, o gerente empreendedor pode determinar o impacto da tecnologia nas atividades e no planejamento do projeto. Com isso, pode escolher o tipo de abordagem de gestão que melhor se enquadra no projeto de P&D sob sua responsabilidade.

Logo, o método TRLs fornece informações críticas para o delineamento de uma nova estrutura de gestão, ajudando o engenheiro a definir com exatidão os objetivos do projeto e a fornecer diretrizes fundamentadas em suas características. Nesse contexto, o gerente empreendedor tem mais autonomia e liberdade para traçar a estratégia tecnológica do projeto. Uma abordagem de gestão voltada para a estratégia tecnológica

deve considerar o desenvolvimento do sistema, a complexidade do projeto e o uso de ferramentas analíticas como apoio à tomada de decisão.

10.2 Considerações finais

Como nosso estudo foi elaborado em um projeto em andamento, não procedemos à avaliação da maturidade, mesmo porque não há uma linha de base para determinar o nível em que se encontrava a tecnologia no estado da arte durante as fases iniciais do ciclo de vida. No entanto, o estudo do projeto MagLev-Cobra nos ajudou a compreender a trajetória evolutiva da tecnologia no contexto da universidade, considerando, contudo, as limitações que vivemos no Brasil, em especial as relacionadas à gestão dos recursos alocados em projetos de P&D. Com relação às conclusões obtidas com o estudo do projeto MagLev-Cobra, notamos que é possível utilizar, mesmo que de forma heterodoxa, o método TRLs como ferramenta complementar de gestão para traçar a estratégia tecnológica do projeto.

O benefício do método TRLs não está, portanto, restrito a seu uso como métrica de avaliação da maturidade de tecnologia. No caso MagLev-Cobra, essa ferramenta analítica foi utilizada para analisar a abordagem de gerenciamento de um projeto de inovação que se encontra em andamento, e contribuiu para identificar algumas dificuldades intercorrentes.

Nossa pesquisa revelou, ainda, que o projeto MagLev-Cobra foi particularmente bem gerido no que tange ao desenvolvimento da tecnologia, considerando o contexto da universidade e respeitadas as políticas públicas e as legislações vigentes. Como o MagLev-Cobra está atualmente em testes de operações do módulo operacional e da pista experimental, acreditamos que uma avaliação da maturidade da tecnologia com base nos TRLs será relevante para o projeto. Essa avaliação da maturidade da tecnologia deverá ser elaborada por um grupo de especialistas independentes, que poderá validar o estado de desenvolvimento da tecnologia e definir o nível de maturidade em que ela se encontra atualmente.

Como, nessa fase do projeto, os engenheiros estudam a implantação da tecnologia MagLev-Cobra na cidade do Rio de Janeiro, e a Coppe/UFRJ busca recursos nas agências de fomento para a construção de uma linha de teste de 5 km, interligando a Ilha do Fundão de ponta a ponta, uma avaliação da maturidade poderá constituir a linha

de base do estado da arte em que se encontra atualmente a tecnologia com relação às novas etapas.

Em outras palavras, uma avaliação do nível de maturidade servirá como linha de base da tecnologia e permitirá que seja traçada uma estratégia tecnológica relacionada a requisitos e especificidades exigidos nessa nova etapa do projeto. Os níveis mais elevados de maturidade só podem ser atingidos quando avaliados com relação ao projeto no qual a tecnologia está sendo incorporada, seja a linha de teste na Ilha do Fundão, seja o trem de levitação magnética na cidade do Rio de Janeiro.

Isso significa que uma avaliação da maturidade da tecnologia nessa fase do projeto deverá considerar o sistema de levitação magnética supercondutora a partir do estado em que ela se encontra atualmente, ou seja, de acordo com os testes do módulo operacional sobre a pista experimental de cerca de 200 metros em linha reta, entre o CT 1 e o CT 2. Com a aprovação de uma nova etapa do projeto, os testes de desempenho do sistema vão requerer um conhecimento adequado do ambiente operacional final, bem como uma redefinição de sua arquitetura. Ao construir uma pista mais longa, com curvas, aclives e declives, e integrar ao sistema um veículo com articulações múltiplas, com dois ou mais módulos, a tecnologia deverá ser aprimorada para atingir essa complexidade.

Os TRLs devem, portanto, ser utilizados como ferramenta que descreve a maturidade de uma dada tecnologia definida pelo o que foi feito e em que condições ela se encontra em determinado espaço de tempo no ciclo de vida do projeto. Entretanto, como método de avaliação dos níveis de maturidade de tecnologia, os TRLs têm suas limitações e, por isso, recomenda-se seu uso com outras métricas. Assim, poderá contribuir de fato para a gestão do projeto, em termos não só da estratégia tecnológica, mas também do gerenciamento de custos, riscos e cronograma de tempo.

Enquanto futuras pesquisas seriam úteis, o método TRLs, nesse momento, pode ajudar a equipe do Lasup a identificar o nível de maturidade da tecnologia no estado da arte em que se encontra atualmente. Com isso, a equipe poderá redefinir as características do projeto MagLev-Cobra e identificar uma abordagem de gestão do projeto que lhe seja mais apropriada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, M. J.; DOREN, C. V. **Como ler livros:** o guia clássico para a leitura inteligente. 1. ed. São Paulo: É Realizações, 2011.

ABNT. **NBR ISO 16290:** sistemas espaciais: definição dos níveis de maturidade de tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. Rio de Janeiro, 2015.

EMBRAPII. **Manual de operação das Unidades Embrapii.** Brasília DF: EMBRAPII, 2015. Disponível em: <http://embrapii.org.br/wp-content/uploads/2014/10/manual_embraapii_unidades_versao_4-0_final_revisado.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2015.

AZIZIAN, N.; SARKANI, S.; MAZZUCHI, T. A comprehensive review and analysis of maturity assessment approaches for improved decision support to achieve efficient defense acquisition. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, 2009, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco, CA: Newswood Limited, International Association of Engineers, 2009. v.2. p. 1.150-1.157. Disponível em: <http://www.iaeng.org/publication/WCECS2009/WCECS2009_pp1150-1157.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2015.

BANKE, J. Technology readiness levels demystified. **National Aeronautics and Space Administration**, Washington D. C. 20 Aug. 2010. Disponível em: <http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/trl_demystified.html>. Acesso em: 23 dez. 2015.

BARROS, H. L. **Santos Dumont e a invenção do voo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2004.

BARTHOLO JUNIOR, R. S. **Poder, conhecimento e ética I.** Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 21 mar. 2013a. Rio de Janeiro, 21 mar. 2013a. Anotações de aula ministrada para os alunos do Programa de Engenharia de Produção.

BARTHOLO JUNIOR, R. S. **Poder, conhecimento e ética II.** Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 6 jun. 2013b. Anotações de aula ministrada para os alunos do Programa de Engenharia de Produção.

BARTHOLO JUNIOR, R. S. **Você e eu:** Martin Buber, presença palavra. Rio de Janeiro: Garamond, 2001.

BILBRO, J. W.; YANG, K. Y. A comprehensive overview of techniques for measuring system readiness. In: NDIA ANNUAL SYSTEMS ENGINEERING CONFERENCE, 12 th., 2009 San Diego. **Proceedings...** San Diego: NDIA Conference, 2009. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/ndia/2009/systemengr/8891WednesdayTrack3Bilbro.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2015.

BILBRO, J. W. Assessing the impacts of technological advancement and insertion. In: NOLTE, W. Did I ever tell you about the whale? or measuring technology maturity. Charlotte: Information Age Publishing, 2008a. p. 151-185. (Appendix D).

BILBRO, J. W. Foreword. In: NOLTE, W. Did I ever tell you about the whale? or measuring technology maturity. Charlotte: Information Age Publishing, 2008b. p. xv-xviii.

BILBRO, J. W. Using the advancement degree of difficulty (AD2) as an input to risk management. In: TECHNOLOGY MATURITY CONFERENCE, 2008c, Virginia Beach.

Technical Report. Disponível em: <<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA507591>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

BILBRO, J. W. Assessing system readiness – is it ready for prime time? Executive Summary. **JB Consulting International**, [2007a]. Disponível em: <<http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/SystemsEngineeringRole.aspx>>. Acesso em: 12 maio 2015.

BILBRO, J. W. A suite of tools for technology assessment. In: AFRL TECHNOLOGY MATURITY CONFERENCE, 2007b, Virginia Beach. **Proceedings...** Virginia Beach: Air Force Research Laboratory, 2007b. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a507181.pdf>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

BILBRO, J. W. Systematic assessment of the program/project impacts of technological advancement and insertion. **JB Consulting International**, [2007c]. Disponível em: <<http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/TechnologyReadinessLevels.aspx>>. Acesso em: 5 dez. 2015.

BILBRO, J. W. Technology assessment requirements for programs and projects. In: MULTI-DIMENSIONAL ASSESSMENT OF TECHNOLOGY MATURITY WORKSHOP, 2006, Fairborn. **Proceedings...** Hunstville: NASA Marshall Space Flight Center, 2006. Disponível em: <<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA507694>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

BILBRO, J. W. Technology readiness levels. **JB Consulting International** [2001a]. Disponível em: <<http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/TechnologyReadinessLevels.aspx>>. Acesso em: 7 maio 2014.

BILBRO, J. W. Technology maturity. **JB Consulting International**, [2001b]. Disponível em: <<http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/TechnologyMaturity.aspx>>. Acesso em: 5 dez. 2015.

BRASIL. Lei nº 13.243, de 11 de janeiro de 2016. Dispõe sobre estímulos ao desenvolvimento científico, à pesquisa, à capacitação científica e tecnológica e à inovação e altera a Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004, a Lei nº 6.815, de 19 de agosto de 1980, a Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, a Lei nº 12.462, de 4 de agosto de 2011, a Lei nº 8.745, de 9 de dezembro de 1993, a Lei nº 8.958, de 20 de dezembro de 1994, a Lei nº 8.010, de 29 de março de 1990, a Lei nº 8.032, de 12 de abril de 1990, e a Lei nº 12.772, de 28 de dezembro de 2012, nos termos da Emenda constitucional nº 85, de 26 de fevereiro de 2015. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília DF, 12 jan. 2016. Seção 1, p. 1. Disponível em: <<http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:lei:2016-01-11;13243>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

BRASIL. Constituição (1988). Emenda constitucional nº 85, de 26 de fevereiro de 2015. Altera e adiciona dispositivos na Constituição Federal para atualizar o tratamento das atividades de ciência, tecnologia e inovação. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília DF, 27 fev. 2015. Seção 1, p. 4. Republicação 3 mar. 2015. Seção 1, p. 4.

Disponível em: <<http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:emenda.constitucional:2015-02-26;85>>. Acesso em 30 mar. 2016.

BRASIL. Decreto da Presidência da República, de 2 de setembro de 2013. Qualifica como organização social a Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial - EMBRAPII. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 set. 2013. Seção 1, p. 8. Disponível em: <http://www.jusbrasil.com.br/diarios/58607423/dou-secao-1-03-09-2013-pg-8?ref=topic_feed>. Acesso em: 30 set. 2015.

BRASIL. Lei nº 11.196, de 21 de novembro de 2005. Institui o Regime Especial de Tributação para a Plataforma de Exportação de Serviços de Tecnologia da Informação – REPES, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília DF, 22 nov. 2005. Seção 1, p. 1. Disponível em: <<http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:lei:2005-11-21;11196>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília DF, 3 mar. 2004. Seção 1, p. 2. Retificação, 16 mar. 2005. Seção 1, p. 1. Disponível em: <<http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:lei:2004-12-02;10973>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 5 out. 1988. Seção 1, nº 191, p. 1. Disponível em: <<http://www.lexml.gov.br/urn/urn:lex:br:federal:constituicao:1988-10-5;1988>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

BUBER, M. **Eu-Tu**. São Paulo: Centauro, 2009.

BURGELMAN, R. A.; CHRISTENSEN, C. M.; WHEELWRIGHT, S. C. **Gestão estratégica da tecnologia e da inovação: conceitos e soluções**. 5. ed. São Paulo: AMGH, 2012.

CNPq. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Resolução normativa nº 15, de 1 de julho de 2010. Bolsas de Fomento Tecnológico e Extensão Inovadora – RN 015/2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília DF, 8 jul. 2010. Seção. 1, p. 9. Disponível em: <http://cnpq.br/web/guest/view/-/journal_content/56_INSTANCE_0oED/10157/25314>. Acesso em: 1 abr. 2016.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

DAVID, D. et al. Rotor levitation by means of active radial magnetic bearing/motor and self-stable superconducting axial bearing. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo, 1998. v. 1. p. 282a-283a.

DE MEYER, A.; LOCH, C.; PICH, M. T. Managing project uncertainty: from variation to chaos. **MIT Sloan Management Review**, Cambridge, v. 43, p. 60-67, 2002.

DE NIGRI, F.; CAVALCANTE, L. R. **Análise dos dados da PINTEC 2011**. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2013. (Nota técnica n. 15). Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/nota_tecnica/131206_notatecnicadiset15.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2016.

- DIAS, D. H. N. et al.. Emulation of a full scale MagLev vehicle behavior under operational conditions. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 23, n. 3, p. 360110-3601105, 2013.
- DIAS, D. H. N. et al. Simulations and tests of superconducting linear bearings for a MagLev. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 19, n. 3, p. 2120-2123, June 2009.
- DIAS, D. H. N. et al. Superconductor magnetic levitation force calculation in a linear bearing using the finite element method. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 8., 2008, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Momag, 2008. v. 1, p. 1-5.
- DICK, S. J. Summary of space exploration initiative. In: GARBER, S. (Coord.). **The space exploration initiative**. Washington, D.C.: NASA, Oct. 19, 2010. Disponível em: <<http://history.nasa.gov/seisummary.htm>>. Acesso em: 31 mar. 2016.
- DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories. **Research policy**, Amsterdam, v. 11, p. 147–162, 1982.
- DUTTA, S.; LANVIN, B.; WUNSCH-VINCENT, S. (Ed.). **The global innovation index 2015: effective innovation policies for development**. Fointainebleau: Insead; Ithaca: Cornell University; Geneva: WiPo, 2015.
- ERTEL, I. D.; NEWKIRK, R. W.; BROOKS, C. G. Man circles the moon, the eagle lands, and manned lunar exploration: July through September 1969 and October through December 1969. In: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (Ed.). **The Apollo spacecraft – a chronology**. Washington. D.C.: NASA, 1978. v. 4. parts 3E and F. Disponível em: <<http://history.nasa.gov/SP-4009/v4p3e.htm>>. Acesso em: 30 mar. 2016.
- ESA. **Technology readiness levels: handbook for space applications**. 1 th. rev. 6. Paris: ESA, 2008.
- FABRÍCIO, T.; TUMA, A. Os mistérios da supercondutividade: passados cem anos de sua descoberta, fenômeno continua a intrigar os cientistas, prometendo avanços tecnológicos revolucionários. [Blog] **Divulgando a supercondutividade**, 8 ago. 2015. Disponível em: <<http://supercondutividade.blogspot.com.br/2015/08/os-misterios-da-supercondutividade.html>>. Acesso em: 5 maio 2016.
- FOSTER, R. N. **Inovação: a vantagem do atacante**. São Paulo: Best Seller, 1988.
- FURTADO, A. T. Ideias fundadoras. Apresentação. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas (SP), v. 11, n. esp., p. 19-25, jul. 2012.
- GIL, A. C. **Estudo de caso**. São Paulo: Atlas, 2009.
- GOMES, R. R.; SOTELO, G.; STEPHAN, R. M. Desenvolvimento de um sistema didático para levitação eletromagnética com o auxílio do método dos elementos finitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 15., 2004, Gramado. **Anais...** Campinas: SBA, 2004. v. 15. p. 1-6.

GRAETTINGER, C. P. et al. **Using the technology readiness levels scale to support technology management in the DoD's ATD/STO environments**. A findings and recommendations report conducted for Army CECOM. Pittsburgh: Software Engineering Institute, 2002. (Special report). Disponível em: <<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA407785>>. Acesso em: 6 maio 2015.

HAAS, O. D et al. Superconductively levitated transport system – The SupraTrans Project. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 15, n. 2, p. 326-332, Jun. 2005.

HESLOP, L.; MCGREGOR, E.; GRIFFITH, M. Development of a technology readiness assessment measure: the Cloverleaf Model of technology transfer. **Journal of Technology Transfer**, Cham, v. 26, p. 369-384, 2001.

HICKS, B. J. et al. A methodology for evaluating technology readiness during product development. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 17 th., 2009, Palo Alto. **Proceedings...** Palo Alto: Design Organization and Management, 2009. v. 3, p. 24-27. Disponível em: <https://www.designsociety.org/publication/28623/a_methodology_for_evaluating_technology_readiness_during_product_development>. Acesso em: 6 maio 2015.

INCOSE. The state-of-the-art practice of Technology Readiness Levels (TRLs) and challenges using this method. [Blog] **Incose UK**, 15 jan. 2016. Disponível em: <http://www.incoseonline.org.uk/Normal_Files/Research/Academic_Research.aspx?CatID=Research>. Acesso em: 17 jan. 2016.

IBGE. **Pesquisa de inovação**: Pintec – 2014. Instruções para preenchimento do questionário. 6. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <http://www.pintec.ibge.gov.br/downloads/manual_de_instrucoes_pintec_202014.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de inovação**: PINTEC – 2011. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: <<http://www.pintec.ibge.gov.br/downloads/pintec2011%20publicacao%20completa.pdf>>. Acesso em 20 jan. 2016.

IEDI. Os dez pontos sobre a indústria e a economia brasileira em 2015. **Carta Iedi n. 724**, São Paulo, 18 mar. 2016. Disponível em: <http://www.iedi.org.br/cartas/carta_iedi_n_724.html>. Acesso em: 28 mar. 2016.

ISO. Space systems – definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment. **ISO 16290:2013(en)**. Geneva, 2013. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16290:ed-1:v1:en>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

LEE, M. C.; CHANG, T.; CHIEN, W. T. C. An approach for developing concept of innovation readiness levels. **International Journal of Managing Information Technology (IJMIT)**, Punjab, v. 3, n. 2, p. 18-37, May 2011.

MADURO. In: DICIONÁRIO online de sinônimos de português do Brasil. Matosinhos: 7 Graus, 2011-2016. Disponível em: <<http://www.sinonimos.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

MADURO. In: DICIONÁRIO Priberam da língua portuguesa, 2008-2013. Disponível em: <<https://www.priberam.pt/dlpo/Default.aspx>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

- MADURO. In: HOUAISS, A (Ed.). Grande dicionário Houaiss da língua portuguesa. Versão Beta. São Paulo: UOL, 2016. Disponível em: <<http://houaiss.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.
- MADURO. In: MICHAELLIS dicionário brasileiro da língua portuguesa. São Paulo: Melhoramentos, 2016. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.
- MANKINS, J. C. Technology readiness and risk assessments: a new approach. **Acta Astronautica**, Amsterdam, v. 65, n. 9-10, p. 1208-1215, 2009a.
- MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: a retrospective. **Acta Astronautica**, Amsterdam, v. 65, n. 9-10, p. 1216–1223, 2009b.
- MANKINS, J. C. Approaches to strategic research and technology (R&T) analysis and road mapping. **Acta Astronautica**, Amstredam, v. 51, n. 1-9, p. 3-21, July 2002.
- MANKINS, J. C. **Technology readiness levels**. A white paper. Washington, D.C.: NASA, 1995. Disponível em: <<https://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>>. Acesso em: 5 maio 2015.
- MANSFIELD, E. et al. Social and private rates of return from industrial innovations. *Revista Brasileira de Inovação*. Campinas (SP), v. 11, n. esp., p. 27-46, jul. 2012.
- MATURIDADE. In: DICIONÁRIO online de sinônimos de português do Brasil. Matosinhos: 7 Graus, 2011-2016. Disponível em: <<http://www.sinonimos.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.
- MATURIDADE. In: DICIONÁRIO Priberam da língua portuguesa, 2008-2013. Disponível em: <<https://www.priberam.pt/dlpo/Default.aspx>>. Acesso em: 2 jul. 2016.
- MATURIDADE. In: HOUAISS, A (Ed.). Grande dicionário Houaiss da língua portuguesa. Versão Beta. São Paulo: UOL, 2016. Disponível em: <<http://houaiss.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.
- MATURIDADE. In: MICHAELLIS dicionário brasileiro da língua portuguesa. São Paulo: Melhoramentos, 2016. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.
- MCCRAW, T. K. **O profeta da inovação**. Rio de Janeiro: Record, 2012.
- MOON, F. C. **Superconducting levitation**. Applications to bearings and magnetic transportation. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- MORGAN, J. Manufacturing Readiness Levels (MRLs) and Manufacturing Readiness Assessments (MRAs). In: TECHNOLOGY MATURITY CONFERENCE, 2008, Virginia Beach. **Technical report**. Disponível em: <<http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA510027>>. Acesso em: 6 maio 2015.
- MOTTA, E. S. et al. Dynamic tests of an Optimized Linear Superconducting Levitation System. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 23, p. 3600504-3600504, 2013.
- MOTTA, E. S. et al. Optimization of a superconducting magnetic rail using a feasible direction interior point algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING

OPTIMIZATION, 2008, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisas em Engenharia / Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2008. 1 CD-ROM. Disponível em: <http://engopt.org/08/nukleo/pdfs/0123_paper_rev12_c.pdf>. Acesso em: 6 maio 2015.

NASA (United States). **Mars Pathfinder** – NASA Science Missions. Washington, D.C., Mar. 17, 2016. Disponível em: <<http://science.nasa.gov/missions/mars-pathfinder/>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

NASA (United States). **NASA technology roadmaps: introduction, crosscutting technologies, and index**. Washington, D.C., 2015. (Draft). Disponível em: <http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2015_nasa_technology_roadmaps_ta_0_introduction_crosscutting_index.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2016.

NASA (United States). Office of Chief Engineer. **NASA procedural requirements – NPR 7123.1B**, Apr. 18, 2013. NASA systems engineering processes and requirements. Washington, D.C., 2013. Disponível em: <http://nodis3.gsfc.nasa.gov/npg_img/N_PR_7123_001B_/N_PR_7123_001B_.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2016.

NASA (United States). Marshall Space Flight Center. **Project management and systems engineering handbook**. Washington, D.C., 2012a. Disponível em: <<https://standards.nasa.gov/standard/msfc/msfc-hdbk-3173>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

NASA (United States). **NASA Strategic space technology investment plan**. Washington, D.C., 2012b. Disponível em: <http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/strategic_space_technology_investment_plan_508.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2015.

NASA (United States). Academy of Program/Project & Engineering Leadership. **Columbia's last mission: case study**. Washington, D.C., 2011a. Disponível em: <http://www.nasa.gov/pdf/592638main_APPEL_Columbia_case_study_2011.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2016.

NASA (United States). **Lessons from the challenger launch decision** – additional resources. Washington, D.C., 2011b. (NASA Case study resources). Disponível em: <[http://www.nasa.gov/centers/goddard/pdf/574228main_GSFC-1041R-1-Challenger\(072211\).pdf](http://www.nasa.gov/centers/goddard/pdf/574228main_GSFC-1041R-1-Challenger(072211).pdf)>. Acesso em: 24 dez. 2015.

NASA (United States). Office of Chief Engineer. **Procedural Requirements – NPR 7120.8 5**, Feb. 5, 2008. NASA Research and Technology Program and Project Management Requirements (w/change 3 dated 04/18/13). Washington, D.C., 2008. Disponível em: <http://nodis3.gsfc.nasa.gov/npg_img/N_PR_7120_0008_/N_PR_7120_0008_.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2016.

NASA (United States). **NASA Systems Engineering handbook**. rev. 1. Washington, D.C., 2007. (Technical report). Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080008301.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2016.

NASA (United States). The Columbia Accident Investigation Board. **Report of the Columbia accident investigation board**. Washington, D.C., 2003. v. 1. Disponível em: <http://s3.amazonaws.com/akamai.netstorage/anon.nasa-global/CAIB/CAIB_highres_full.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2016.

NASA (United States). Jet Propulsion Laboratory. California Institute Of Technology. **Mars Pathfinder fact sheet**. Pasadena, Mar. 19, 1997. Disponível em: <http://mars.nasa.gov/MPF/mpf/fact_sheet.html>. Acesso em: 31 mar. 2016.

[NASA \(United States\). Office of Aeronautics and Space Technology. 1991 integrated technology plan for the civil space program](#). Washington, D.C., 1991a. (Technical report). Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19920022390.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2016.

NASA (United States). Office of Aeronautics, Exploration and Technology. **Transportation Technology Program: strategic plan**. Washington, D.C., 1991b. (Technical report). Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930013843.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2016.

[NASA \(United States\). Office of Aeronautics and Space Technology. NASA space systems technology model](#). Washington, D.C., 1980. v. 1. Disponível em: <<https://archive.org/details/nasaspacesystems0100unit>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

NRC (United States). National Academic of Sciences. **Improving NASA's technology for space science**. Washington, D.C., 1993. (Technical report). Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930010200.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2016.

NRC (United States). Committee on Human Exploration of Space. **Human exploration of space: a review of Nasa's 90-day study and alternatives**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1990. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19900014102.pdf>>. Acesso em: 1 mar. 2016.

NSC (United States). Executive Office of the President of the United States. **Report of the Advisory Committee on the Future of the U.S. Space Program**. Washington, D.C., 1990. (Augustine comission). Disponível em: <<http://www.nss.org/resources/library/spacepolicy/AugustineReport1990.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

NSC (United States). Executive Office of the President of the United States. **America at the Threshold: report of the Synthesis Group on America's space exploration initiative**. Washington, D.C., 1991. (Stafford report). Disponível em: <<http://history.nasa.gov/staffordrep/staffordreport.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2015.

NELSON, R. R. **National innovation system: a comparative analysis**. New York: Oxford University Press, 1993.

NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **An evolutionary theory of economic change**. Cambridge: Harvard U. P., 1982.

NICOLSKY, R. et al. The current state of the Brazilian project for a superconducting magnetic levitation train. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETICALLY LEVITATED SYSTEMS AND LINEAR DRIVES, 17 th., 2002, Lausanne. Proceedings... Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, 2002, v. 1, p. 1-7.

NICOLSKY, R. et al. The Brazilian project for a superconducting magnetic levitation train. In: **International CONFERENCE ON MAGNETICALLY LEVITATED SYSTEMS AND**

LINEAR DRIVES, 16 th., 2000, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2000, v. 1. p. 179-182.

NICOLSKY, R. et al. Superconducting axial bearings for induction machines with active radial magnetic bearings. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 9, p. 964-967, 1999.

NOLTE, W. L. **Did I ever tell you about the whale?** or measuring technology maturity. Charlotte: Information Age Publishing, 2008.

NOLTE, W. L. Technology readiness calculator, a white paper. In: ANNUAL SYSTEMS ENGINEERING CONFERENCE, 6th., 2003, San Diego. **Online proceedings...** San Diego, NDIA, 2003. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/ndia/2003systems/nolte2.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2016.

NOLTE, W. L.; KENNEDY, B. C.; DZIEGIEL, R. J. Technology readiness calculator. In: ANNUAL SYSTEMS ENGINEERING CONFERENCE, 6th., 2003, San Diego. **Online proceedings...** San Diego: NDIA, 2003. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/ndia/2003systems/2003systems.html>>. Acesso em: 15 maio 2016.

OLECHOWSKI, A.; EPPINGER, S. D.; JOGLEKAR, N. Technology readiness levels at 40: a study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities. **MIT Sloan Research Paper**, Cambridge, v. 15, n. 5127, April, 2015. Disponível em: <<http://ssrn.com/abstract=2588524>>. Acesso em: 30 jan. 2016.

OLIVEIRA, R. A. H. et. al. Evaluation of linear induction motors with two different topologies by FEM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LINEAR DRIVES FOR INDUSTRY APPLICATION, 10th., 2015a, Aachen. **Proceedings...** Aachen: Institute of Electrical Machines, 2105a. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281288523_Evaluation_of_linear_induction_motors_with_two_different_topologies_by_FEM>. Acesso em: 30 jan. 2016.

OLIVEIRA, R. A. H. et. al. Finite element analysis of the forces developed on linear induction motors. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, 13., Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Fortaleza: IEEE, 2015b. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7413933&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A7420013%29&pageNumber=2>. Acesso em: 30 jan. 2016.

OCDE. **Manual de Oslo:** diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação. 3. ed. Brasília, DF: FINEP, 2005.

ORTIZ CANTÚ, S.; PEDROZA ZAPATA, A. R. ¿Qué es la Gestión de la innovación y la Tecnología (GIInT)? **Journal of Technology Management & Innovation**, Santiago, v. 1, n. 2, p. 64-82, jun. 2006. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/847/84710206.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

PROENÇA JUNIOR, D.; SILVA, E. R.. Contexto e processo do mapeamento sistemático da literatura no trajeto da pós-graduação no Brasil. **TransInformação**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 233-240, maio/ago., 2016.

PRONTIDÃO. In: DICIONÁRIO online de sinônimos de português do Brasil. Matosinhos: 7 Graus, 2011-2016. Disponível em: <<http://www.sinonimos.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

PRONTIDÃO. In: DICIONÁRIO Priberam da língua portuguesa, 2008-2013. Disponível em: <<https://www.priberam.pt/dlpo/Default.aspx>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

PRONTIDÃO. In: HOUAISS, A (Ed.). Grande dicionário Houaiss da língua portuguesa. Versão Beta. São Paulo: UOL, 2016. Disponível em: <<http://houaiss.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

PRONTIDÃO. In: MICHAELLIS dicionário brasileiro da língua portuguesa. São Paulo: Melhoramentos, 2016. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

PRONTO. In: DICIONÁRIO online de sinônimos de português do Brasil. Matosinhos: 7 Graus, 2011-2016. Disponível em: <<http://www.sinonimos.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

PRONTO. In: DICIONÁRIO Priberam da língua portuguesa, 2008-2013. Disponível em: <<https://www.priberam.pt/dlpo/Default.aspx>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

PRONTO. In: HOUAISS, A (Ed.). Grande dicionário Houaiss da língua portuguesa. Versão Beta. São Paulo: UOL, 2016. Disponível em: <<http://houaiss.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

PRONTO. In: MICHAELLIS dicionário brasileiro da língua portuguesa. São Paulo: Melhoramentos, 2016. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2016.

QUINTERO, F. A.; FALASCONI, M.; JOVANOVIC, A. Integrated technology readiness and risks assessment: a new tool for innovation managers. In: TECHNOLOGY, MANAGEMENT AND POLICY GRADUATE CONSORTIUM MEETING, 2014, Lisbon, **Online proceedings**. ... Lisbon: TMP, 2014. Disponível em: <http://in3.dem.ist.utl.pt/tmp2014/final_programme.asp>. Acesso em: 31 mar. 2016.

RAMIREZ-MARQUEZ, J. E.; SAUSER, B. J. System Development Planning via System Maturity Optimization. **IEEE Transaction on Engineering Management**, [S.l.], v. 56, n. 3, p. 533-548, Aug. 2009.

ROBINSON, J. W. et al. The need for technology maturity of any advanced capability to achieve better life cycle cost. In: AIAA/ASME/SAE/ASEE JOINT PROPULSION CONFERENCE EXHIBIT, 45th., 2009, Denver. **Conference paper**. Denver: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009. p. 1-13. Disponível em: <http://www.spacepropulsion.org/uploads/2/5/3/9/25392309/2009jpc5347-2june2009_paper.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2016.

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

SAUSER, B. et. al. A systems approach to expanding the technology readiness level within defense acquisition. Hoboken: Institute of Technology/School of Systems and Enterprises, 2009. (Sponsored reporte series). Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a530242.pdf>>. Acesso em 28 dez. 2015.

SAUSER, B et. al. A system maturity index for the systems engineering life cycle. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, Olney, v. 3, n. 6, p. 673-691, 2008.

SAUSER, B. et al. From TRL to SRL: the concept of systems readiness levels. In: **Conference on Systems Engineering Research**, 2006, Los Angeles. **Conference paper**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228652562_From_TRL_to_SRL_The_concept_of_systems_readiness_levels>. Acesso em: 05 maio 2015.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do desenvolvimento econômico**: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico. São Paulo: Abril Cultural, 1982. (Os economistas).

SCIMAGO JOURNAL & COUNTRY RANK. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas University of Granada, 2007-July 2015. Disponível em: <http://www.scimagojr.com/countryrank.php?area=0&category=0®ion=all&year=2014&order=it&min=0&min_type=it>. Acesso em: 21 mar. 2016.

SILVA, E. R.; PROENÇA JR, D. Não ser não é não ter: engenharia não é ciência (nem mesmo ciência aplicada). In: PROENÇA, A. et al. (Org.). **Gestão da inovação e competitividade no Brasil**: da teoria para a prática. 1ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. v. 1. p. 197-218.

SMITH, J. An alternative to technology readiness levels for non-developmental item (NDI) software. In: Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 38th., 2005, Big Island. **Proceedings...** Big Island: IEEE Computer Society, 2005. v. 9, p. 315a.

SOTELO, G. G et. al. MagLev Cobra: test facilities and operational experiments. **Journal of Physics: Conference Series** [online], Bristol, v. 507, 2014. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/507/3/032017/pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

SOTELO, G. G et. al. Tests with one module of the Brazilian Maglev-Cobra vehicle. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 99, p. 1-1, 2013.

SOTELO, G. G. et. al. Operational tests of a full scale superconducting MagLev vehicle unit. **Physics Procedia**, Amsterdam, v. 36, p. 943-947, 2012.

SOTELO, G. G. et. al. Experimental and theoretical levitation forces in a superconducting bearing for a real-scale Maglev system. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 21, p. 3532-3540, 2011.

SOTELO, G. G. et al. Tests on a superconductor linear magnetic bearing of a full-scale MagLev vehicle. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 21, p. 1464-1468, 2010a.

SOTELO, G. G. et. al. Experiments in a real scale maglev vehicle prototype. **Journal of Physics: Conference Series** [online], Bristol, v. 234, part 3, 2010b. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/234/3/032054/pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

STEPHAN, R. M. MagLev-Cobra: tecnologia de levitação magnética no Brasil. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. 55, p. 20-25, 2015.

STEPHAN, R. M. Levitação magnética: uma quebra de paradigma no transporte de massa do século XXI. In: CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 4., 2010, São Paulo. Anais... São Paulo: Coninfra, 2010. p. 4-20.

STEPHAN, R. M. et. al. **Mancais Magnéticos**: mecatrônica sem atrito. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2013.

STEPHAN, R. M.; FERREIRA, A. C. Superconducting light rail vehicle: a transportation solution for highly populated cities. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, Syracuse, v. 7, p. 122-127, 2012.

STEPHAN, R. M. et. al. A full-scale module of the Maglev-Cobra HTS-superconducting vehicle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETICALLY LEVITATED SYSTEMS AND LINEAR DRIVES, 20th., 2008, San Diego. **Online proceedings...** San Diego: MAGLEV, 2008. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.469.9828&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 30 maio 2015.

STEPHAN, R. M. et. al. Superconducting levitation vehicle prototype. **Physica C: Superconductivity**, Amsterdam, v. 408, p. 932-934, 2004.

STEPHAN, R. M. et. al. Levitation force and stability of superconducting linear bearings using NdFeB and ferrite magnets. **Physica C: Superconductivity**, Amsterdam, v. 386, p. 490-494, 2003a.

STEPHAN, R. M. et. al. Um protótipo brasileiro de trem de levitação magnética. **Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v. 8, p. 1-8, 2003b.

STEPHAN, R. M. et. al. A superconducting levitated small scale vehicle with linear synchronous motor. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONIC, 2003c, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2003c. v. 1, p. 206-209.

STEPHAN, R. M. et. al. Espaço Coppe de tecnologia e desenvolvimento humano, um exemplo didático: experiências de levitação. In: ENCONTRO EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 8., 2002a, Petrópolis. **Anais...** Petrópolis: EEE, 2002a. v.1. p. 1-8.

STEPHAN, R. M. et. al. Experiências de levitação magnética. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14., 2002b, Natal. **Anais...** Natal: CBA, 2002b. v. 1, p. 309-312.

STEPHAN, R. M. et al. Laboratory prototype of a superconducting levitation train. In: 2002 - INTERNATIONAL WORKSHOP ON HTS MAGLEV, 1th., 2002, Chengdu. **Proceedings...**, Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002c. v. 1. p. 27-31.

STEPHAN, R. M. et al. Superconducting magnetic levitation train prototype. In: [EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS](#), 9th., 2001, Graz. **Proceedings...** Graz: EPE, 2001. CD-ROM. v. 1.

STEPHAN, R. M. et. al. Hybrid superconducting electromagnetic bearing for induction machines. In: EUROPEAN CONFERENCE ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, 4th., 1999, Sitges. **Proceedings...** Sitges: CRC Press, 1999. p. 1091-1094.

STEPHAN, R. M., ANDRADE JR., R., POLASEK, A. Prospective applications of high temperature superconductors in the electric power energy sector. **Eletroevolução**, Rio de Janeiro, v. 40, p. 67-74, 2005.

STEPHAN, R. M.; SUCENA, M. P.; KRUEGER, R. The opportunity of MagLev in respect to the upcoming mega events in Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NETWORKS FOR

MOBILITY, 5th., 2010, Stuttgart. **Proceedings...** Stuttgart: University of Stuttgart, 2010. 1 CD-ROM.

STRAUB, J. In search of technology readiness level (TRL) 10. **Aerospace Science and Technology**, Amsterdam, v. 46, p. 312-320, 2015.

TETLAY, A.; JOHN, P. Determining the lines of system maturity, system readiness and capability readiness in the system development lifecycle. ANNUAL CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING RESEARCH, 7th., 2009, Loughborough. **Online proceedings...** Loughborough: CSER, 2009. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.614.9724&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 6 maio 2016.

THIOLLENT, M. J. Os processos cognitivos e normativos da tecnologia e suas implicações na pesquisa e no ensino. In: BARTHOLO, R.; DUARTE, F. J. de C. M.; CIPOLLA, C. (Org.). **A projeção e seus horizontes: questões contemporâneas para a Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro: E-papers, 2012. v. 6. p. 39-57. (Cadernos do Grupo de Altos Estudos).

TIRONI, L. F. Política de inovação tecnológica: escolhas e propostas baseadas na Pintec. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 46-53, jan/mar. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/spp/v19n1/v19n1a04.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Instruction 5000.2** – operation of the Defense Acquisition System. Washington, D.C.: Department of Defense, 2015a. Disponível em: <[http://acc.dau.mil/adl/en-US/716926/file/78952/Instruction%20-%20USD%20\(AT_L\),%20DoDI%205000.02,%20Operation%20of%20DAS,%207%20Jan%202015.pdf](http://acc.dau.mil/adl/en-US/716926/file/78952/Instruction%20-%20USD%20(AT_L),%20DoDI%205000.02,%20Operation%20of%20DAS,%207%20Jan%202015.pdf)>. Acesso em: 31 mar. 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **Manufacturing Readiness Level (MRL) deskbook**. Version 2.4. Washington, D.C.: Manufacturing Technology Program, 2015b. Disponível em: <http://www.dodmrl.com/MRL_Deskbook_V2.4%20August_2015.pdf>. Acesso em 31 mar. 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **Defense acquisition guidebook (DAG Guidebook)**. Washington, D.C.: The Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics, 2013. Disponível em: <https://acc.dau.mil/docs/dag_pdf/dag_complete.pdf>. Acesso em: 1 maio 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance**. Washington, D.C.: Assistant Secretary of Defense for Research and Engineering, 2011. Disponível em: <<http://www.acq.osd.mil/chieftechnologist/publications/docs/TRA2011.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook**. Updated. Washington, D.C.: Deputy Under Secretary of Defense for Science and Technology, 2009.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook**. Updated. Washington, D.C.: Deputy Under Secretary of Defense for Science and Technology, 2005.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Directive 5000.01** – the defense acquisition system, May 12, 2003. Washington, D.C., 2003a. (Certified current as of Nov. 20, 2007). Disponível em: <<http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/500001p.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook**. Washington, D.C.: Deputy Under Secretary of Defense for Science and Technology, 2003b. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a418881.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Instruction 5000.2-R** – interim defense acquisition guidebook. Washington, D.C., 2002a.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Instruction 5000.2-R** – mandatory procedures for Major Defense Acquisition Programs (MDAPS) and Major Automated Information System (MAIS) acquisition programs, Apr. 5, 2002b. Washington, D.C., 2002b. Disponível em: <http://www.explorationsystems.nasa.gov/documents/TTT_052005/DoD50002R.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2016.

UNITED STATES. Department of Defense. **DoD Directive 5000.01** – the defense acquisition system, Oct. 23, 2000. Washington, D.C., 2000. (Certified current as of Nov. 20, 2007). Disponível em: <<http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/500001p.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

UNITED STATES. General Accounting Office. **Best practices**: better management of technology development can improve weapon system outcomes. GAO/NSIAD-99-162. Washington, D.C.: Senate, Jul.1999. Disponível em: <<http://www.gao.gov/archive/1999/ns991620.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2015.

UNITED STATES. Executive Office of the Presidente of the United States. **Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident**. Washington, D.C., 1986. (Rogers comission). Disponível em: <<http://history.nasa.gov/rogersrep/genindex.htm>>. Acesso em: 31 mar. 2016.

VALERDI, R.; KOHL, R. J. An approach to technology risk management. In: ENGINEERING SYSTEMS DIVISION SYMPOSIUM, 2004, Cambridge. **Online proceedings**... Cambridge: MIT, 2004. Disponível em: <<https://esd.mit.edu/symposium/pdfs/papers/valerdi.pdf>>. Acesso em: 06 maio 2015.

WATANABE, E. H. Os quatro quadrantes do conhecimento: como ser um inovador? In: ERBASE: NAS ÁGUAS DO SERTÃO, 12., 2012, Petrolina: SBC, 2012. (Apresentação técnica).

WATANABE, E. H. Como a IC pode ajudar a postura de um graduando. SIMPÓSIO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO: HISTÓRIA, TRADIÇÃO E CONHECIMENTO, 1., 2008, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos**... Rio de Janeiro: UFRJ, 2008. Disponível em: <www.posgrados.udelar.edu.uy/renderResource/index/resourceId/34395/siteId/10>. Acesso em: 6 maio 2015.

YIN, R. K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos.5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZAWISLAK, P. A. et al. Inovação, curva S e as ações da firma: impressões e avanços a partir do setor de videogames no Japão. In: SIMPÓSIO DE GESTÃO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 25., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília: ANPAD, 2008. p. 1-16.

APÊNDICE A - Obras consultadas

ANDRADE JR, R. et al. Performance of Nd-Fe-B and ferrite magnets in superconducting linear bearings with Bulk YBCO. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 13, p. 2271-2274, 2003.

BATISTA, E. M.; SILVA, A. C.; STEPHAN, R. M. Elevado em estrutura mista de aço e concreto para percurso do trem de levitação magnética da Coppe/UFRJ In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA SUSTENTÁVEL, 1., 2013, Porto. o.

DIAS, D. H. N. et al. Dynamical tests in a linear superconducting magnetic bearing. **Physics Procedia**, Amsterdam, v. 36, p. 1049-1054, 2012.

DIAS, D.H.N. et al. Simulations and tests of superconducting linear Bearings for a MAGLEV prototype. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse (Print), v. 19, p. 2120-2123, 2009.

FERREIRA, A. C., STEPHAN, R. M., MOREIRA, M. A. C. Linear synchronous motor design using fem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, 2003, FORTALEZA. **Anais...** Fortaleza: Copeb, 2003. v.1. p.1-5.

MATTOS, L. S. et al.. Force and current characteristics of a linear induction motor used for the traction of a maglev vehicle. CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado: Cobep, 2013. v. 1.

MOREIRA, M. A. C., et al. Long armature linear synchronous motor for a magnetically levitated vehicle. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES, 15th, 2002, Burges. **Proceedings...** Burges: **ICEM**, 2002. v. 1. p. 1-6.

MOREIRA, M. A. C., FERREIRA, A. C., STEPHAN, R. M. Projeto e construção de veículo com tração elétrica utilizando motor linear e levitação supercondutora. In: SEMINÁRIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM ENGENHARIA COM O PROGRAMA ANSYS, 2., 2001, Rio de Janeiro: **SOFTEC**, 2001. v. 1. p. 1-11.

MOTTA, E. S. et al. Optimization of a linear superconducting levitation system. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Syracuse, v. 21, p. 3548-3554, 2011.

NICOLSKY, R. et al. Development of hybrid bearing system with thrust superconducting magnetic bearing and radial active electrodynamic bearing. **Physica C: Superconductivity and its applications**, v. 341, p. 2509-2512, 2000.

NICOLSKY, R. et al. Superconducting/electromagnetic hybrid bearing using YBCO bulk blocks for passive axial levitation. **Superconductor Science and Technology**, v. 13, p. 870-874, 2000.

OLIVEIRA, R. A. H. et al. Evaluation of linear induction motors with two different topologies by FEM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LINEAR DRIVES FOR INDUSTRY APPLICATION, 10th., 2015, Aachen. **Proceedings...** Aachen: LDIA, 2015. v. 1

OLIVEIRA, R. A. H. et al. Finite element analysis of the forces developed on linear induction motors. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, Fortaleza, 2015. **Anais...** Fortaleza: Cobep, 2015,

- OLIVEIRA, R. A. H. et. al. Regenerative braking of a linear Induction motor used for the traction of a MagLev vehicle. **Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v. 19, p. 241-251, 2014.
- OLIVEIRA, R. A. H.; STEPHAN, R.M. Energy regeneration in a magnetically levitated Vehicle for urban transportation. In: ENERGY EFFICIENCY IN MOTOR DRIVEN SYSTEMS, 2013, **Anais...** Rio de Janeiro: EEMODS, 2013 v. 1.
- OLIVEIRA, R. A. H. et. al. Regenerative braking of a linear induction motor used for the traction of a maglev vehicle. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, 2013, Gramado. **Anais...** Gramado: Cobep, 2013. v. 1.
- SANTISTEBAN, J. A., et al.. Hybrid bearing for induction machine with controlled electromagnetic positioning and superconducting levitation. **IEEE Transactions on Magnetics**. Syracuse, v. 36, p. 3693-3695, 2000.
- SANTOS, M. D. A.; STEPHAN, R. M. Synchronized operation of a magnetically levitated vehicle. In: XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 11., Natal, 2011. **Anais...** Natal: Cobep, 2011, p. 50-54.
- STEPHAN, R. M.; FERREIRA, A. C. Superconducting light rail vehicle: a transportation solution for highly populated cities. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, Syracuse, v. 7, p. 122-127, 2012.
- STEPHAN, R.M. et al.. MagLev-Cobra: an urban transportation system for highly populated cities In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON MAGLEV TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY, 3th, St. Petersburg, 2015. **Proceedings...** St. Petersburg: MTCT, 2015.
- STEPHAN, R.M. et al. MagLev-Cobra: an urban transportation system for highly populated cities. In: 3rd International Scientific Conference on MagLev Transportation Systems and Technology, 2015, **MTCT'2015**. St. Petersburg, 2015.
- STEPHAN, R. M. et al. The first full scale functional prototype of the superconducting magnetically levitated vehicle MagLev-Cobra. In: XXI INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETICALLY LEVITATED SYSTEMS AND LINEAR DRIVES, 21th., Daejeon, 2011.
- STEPHAN, R. M. et al. A superconducting magnetic levitation train prototype in closed loop track. In: International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. **MAGLEV.**, Shanghai. 2004.
- SUCENA, M. P.; STEPHAN, R. M.; ALMEIDA Jr., V. Neuro-Fuzzy integral model for holistic evaluation of an urban Magnetic Levitation Transportation System. **Brazilian Journal of Operations and Production Management**, Rio de Janeiro, v. 10, p. 1, 2013.
- SUCENA, M. P.; STEPHAN, R. M. Modelo para gestão ambiental de sistemas de transporte urbano por levitação magnética com aplicação da teoria fuzzy. **Journal of Transport Literature**, Brasília, DF, v. 6, p. 152-179, 2012.

APÊNDICE B - Quadro da escala TRLs da Nasa

TRL	DEFINIÇÃO	DESCRIÇÃO DE <i>HARDWARE</i>	DESCRIÇÃO DE <i>SOFTWARE</i>	CRITÉRIO DE SAÍDA
1	Princípios básicos observados e relatados.	Conhecimento científico gerado confirma conceitos/aplicações da tecnologia do <i>hardware</i> .	Conhecimento científico gerado confirma propriedades básicas da arquitetura do <i>software</i> e da formulação matemática.	Publicação em revista indexada (revisada por pares) de pesquisa destacando conceitos/aplicações propostos.
2	Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados.	Começa a fase de criação. As aplicações práticas são identificadas, mas especulativas, nenhuma prova experimental ou análise detalhada para apoiar a conjectura.	Aplicação prática é identificada, mas especulativa; nenhuma prova experimental ou análise detalhada para apoiar a conjectura. Propriedades básicas de algoritmos, representações e conceitos são definidos.	Princípios básicos são codificados. Experimentos realizados com dados sintéticos. Descrição documentada de aplicação/conceito que aborda viabilidade e benefícios.
3	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característico.	Estudos analíticos colocam a tecnologia em um contexto apropriado. Demonstrações laboratoriais, manifestações, modelagem e simulação validam a previsão analítica.	Desenvolvimento de funcionalidade limitada para validar propriedades críticas e previsões usando componentes de <i>software</i> não integrados.	Resultados analíticos /experimentais documentados validando previsões de parâmetros-chave.
4	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente de laboratório.	Placa de ensaio de componente/sistema de baixa fidelidade é construída e operada para demonstrar funcionalidade básica e ambientes de teste críticos, e as previsões de desempenho associados são definidas em relação ao ambiente operacional final.	Componentes-chave de funcionalidade crítica de <i>software</i> são integrados e validados funcionalmente para estabelecer a interoperabilidade e iniciar o desenvolvimento da arquitetura. Ambientes relevantes definidos e desempenho no ambiente previsto.	Teste de desempenho documentado, demonstrando estar de acordo com as previsões analíticas. Definição documentada de ambiente relevante.
5	Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente relevante.	Fidelidade média da maquete do sistema / componente é construída e operada para demonstrar o desempenho geral em um ambiente operacional simulado, com elementos de suporte realistas que demonstram o desempenho geral em áreas críticas. Previsões de desempenho são feitas para as fases seguintes de desenvolvimento.	Elementos de <i>software</i> implementados de ponta a ponta e integrados a sistemas / simulações existentes em conformidade com o ambiente alvo. Sistema de <i>software</i> testado de ponta a ponta em ambiente relevante, atendendo desempenho previsto. Desempenho do ambiente operacional previsto. Implementações de protótipos desenvolvidos.	Teste de desempenho documentado, demonstrando estar de acordo com as previsões analíticas. Definição documentada de requisitos de escala.

TRL	DEFINIÇÃO	DESCRIÇÃO DE HARDWARE	DESCRIÇÃO DE SOFTWARE	CRITÉRIO DE SAÍDA
6	Demonstração de modelo ou protótipo do sistema / subsistema em um ambiente relevante.	Protótipo de sistema / componente de alta fidelidade que trata de forma adequada todos os problemas de escala críticos é construído e operado em um ambiente relevante para demonstrar as operações em condições ambientais críticas.	Implementações do protótipo do <i>software</i> demonstram os problemas realistas em escala real. Parcialmente integrado a sistemas de <i>hardware</i> / <i>software</i> existentes. Documentação limitada disponível. Viabilidade da engenharia demonstrada plenamente.	Teste de desempenho documentado, demonstrando estar de acordo com as previsões analíticas.
7	Demonstração de protótipo do sistema em um ambiente operacional.	Unidade de engenharia de alta fidelidade que aborda de forma adequada todos os problemas de escala críticos é construída e operada em um ambiente relevante para demonstrar o desempenho no ambiente operacional real e na plataforma (solo, ar ou espaço).	Protótipo de <i>software</i> existe com todas as funcionalidades-chave disponíveis para demonstração e teste. Bem integrado a sistemas de <i>hardware</i> / <i>software</i> operacionais que demonstrem viabilidade operacional. A maioria dos <i>bugs</i> de <i>software</i> foram removidos. Documentação disponível limitada.	Teste de desempenho documentado, demonstrando estar de acordo com as previsões analíticas.
8	Sistema real concluído e “qualificado para voo” por meio de teste e demonstração.	Produto final em sua configuração final é demonstrado com sucesso por meio de teste e análise de seu ambiente operacional pretendido e sua plataforma (solo, ar ou espaço).	Todo o <i>software</i> foi minuciosamente depurado e totalmente integrado a todos os sistemas de <i>hardware</i> e <i>software</i> operacionais. Toda a documentação do usuário, documentação de treinamento e documentação de manutenção concluídas. Todas as funcionalidades demonstradas com sucesso em cenários operacionais simulados. Verificação e validação concluídas.	Teste de desempenho documentado, verificando previsões analíticas.
9	Sistema real “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida.	O produto final é operado com sucesso em uma missão real.	Todo o <i>software</i> foi minuciosamente depurado e está completamente integrado a todos os sistemas de <i>hardware</i> e <i>software</i> operacionais. Toda a documentação foi concluída. Existe suporte de <i>software</i> para dar manutenção. Sistema foi operado com sucesso no ambiente operacional.	Resultados operacionais da missão documentados.

Nota: Em caso de conflito entre diretivas da Nasa a respeito das definições dos TRLs, prevalece o disposto na NPR 7123.1.

Fonte: NPR 7123.1B, Apêndice E, 18 abr. 2013 (NASA, 2013).

APÊNDICE C - Quadro de definição e descrição de termos técnicos.

TERMO	DESCRIÇÃO
<i>Ad hoc</i>	Expressão latina cuja tradução literal é “para isto” ou “para esta finalidade”. Em engenharia de sistemas, essa expressão é utilizada para resolver determinado problema ou realizar tarefa específica. No meio acadêmico, o termo <i>ad hoc</i> é utilizado para designar o revisor de um trabalho científico submetido para publicação em um periódico ou revista científica sem, contudo, participar como membro permanente do corpo editorial.
Ambiente laboratorial (<i>Laboratory environment</i>)	Ambiente controlado onde é realizado testes para demonstrar os princípios adjacentes e o desempenho técnico (funções) de um elemento. Ambiente que não se assemelha ao ambiente operacional do sistema, subsistema ou componente (<i>hardware</i> ou <i>software</i>) a ser construído.
Ambiente operacional (<i>Operational environment</i>)	Ambiente que tem as condições naturais e induzidas, sobre as quais o produto final vai ser operado. No caso de <i>hardware</i> , será o ambiente definido pelo âmbito das operações. Para <i>software</i> , o ambiente será definido pela plataforma operacional e pelo sistema operacional do <i>software</i> . O ambiente operacional será o espaço, no caso de <i>hardware/software</i> para voos espaciais.
Ambiente relevante (<i>Relevant environment</i>)	Ambiente que representa um subconjunto específico do ambiente operacional, necessário para demonstrar aspectos das funções críticas do sistema/subsistema/ componente, com o fim de definir os requisitos de desempenho.
Componente (<i>Component</i>)	Duas ou mais partes capazes de desmontagem ou substituição. Por exemplo, placa de circuito.
Elemento (<i>Element</i>)	Componente, subsistema, sistema, item ou parte de um equipamento ou peça a ser considerada na avaliação da maturidade de tecnologia.
Especificação (<i>Specification</i>)	Um documento que define de forma completa, precisa e verificável requisitos, <i>design</i> , comportamento ou características de um sistema ou de seu componente.
Parte (<i>Part</i>)	Peça única acoplada a um sistema que, se for desmontado, a peça ficará danificada ou destruída.
Prova de conceito (<i>Proof of concept</i>)	Modelo prático capaz de provar um princípio básico estabelecido por uma pesquisa científica. Geralmente, o modelo é utilizado para a demonstração analítica e experimental de conceitos de <i>hardware</i> e/ou <i>software</i> que podem ou não ser incorporados ao desenvolvimento subsequente da tecnologia e/ou em unidades operacionais
Maquete (<i>Mockup</i>)	Modelo de desenvolvimento ou modelo de testes de desenvolvimento. Qualquer um de uma série de unidades do modelo, construída para avaliar aspectos sobre a forma, a configuração e a função crítica do subsistema/componente. Embora essas unidades possam apresentar alguns aspectos de alta fidelidade, em geral, são vistas como modelos que se encaixam na categoria de placa de ensaio, pois a verificação é de baixa fidelidade, limitada ao ambiente de laboratório.
Modelos (<i>Models</i>)	Existem diversos tipos de modelos de engenharia. A norma ABNT NBR ISO 16290:2015 não faz distinção quanto sua classificação para a avaliação da maturidade da tecnologia pelo método TRLs. Essa norma de padronização brasileira define modelo como uma “representação física ou abstrata de aspectos relevantes de um elemento que serve de base para cálculos, previsões, ensaios e avaliações futuras” (ABNT, 2015, p. 2).
Modelo de engenharia (<i>Engineering model</i>)	Unidade de alta fidelidade, em escala completa, que demonstra aspectos críticos dos processos de engenharia, envolvidos no desenvolvimento operacional do sistema. Ele demonstra forma, configuração, função ou qualquer combinação destes em uma escala que é considerada representativa do produto final, capaz de operar em seu ambiente operacional. A unidade de teste de engenharia é construída com o objetivo de se assemelhar ao máximo possível do produto final (<i>hardware/software</i>), e testada de modo a estabelecer a confiança de que o projeto vai funcionar no ambiente esperado. Em alguns casos, a unidade de engenharia poderá tornar-se o modelo operacional ou produto final.

TERMO	DESCRIÇÃO
Modelo em subescala <i>(Subscale model)</i>	Unidade construída em subescala para reduzir custos e tratar de aspectos críticos do sistema final. Se feito em uma escala considerada adequada para a demonstração final do desempenho do sistema/subsistema pode tornar-se o protótipo.
Modelo “demonstrado em voo” <i>(“Flight proven”)</i>	<i>Hardware</i> e/ou <i>software</i> idêntico ao que foi operado com sucesso em uma missão espacial (TRL 9).
Modelo de prova <i>(Proof of model)</i>	Unidade construída para validação funcional do sistema até o ponto de ruptura de condições naturais (tempo, clima, radiação etc.) e induzidas (interferência eletromagnética, vibração, cargas de força etc.)
Modelo “qualificado para voo” <i>(“Flight qualified”)</i>	Unidade (de voo) testada para os níveis que demonstram as margens desejadas, particularmente para expor esforço de fadiga. As vezes, essa unidade é construída para efetuar testes com o objetivo de medir falhas no sistema. Nesse caso, a unidade nunca é usada para operações (de voo), mas para testes de desempenho da capacidade máxima prevista, por exemplo, com relação a eixos de choque, acústica, vibração e carga estática para voo não tripulado.
Placa de ensaio <i>(Breadboard)</i>	Unidade de baixa fidelidade, utilizada como base para a construção de protótipos de produtos eletrônicos. Originalmente, era usado uma tábua de pão, um pedaço polido de madeira para cortar pão. Hoje em dia, o termo se refere a um protótipo em escala de bancada de laboratório, com o qual se demonstra somente a função crítica do elemento, sem precisar apresentar o formato ou a configuração do sistema, no caso de <i>hardware</i> , ou da plataforma, no caso de <i>software</i> . Muitas vezes, a placa de ensaio usa componentes comerciais e/ou <i>ad hoc</i> , e não se destina a fornecer informações definitivas com relação ao desempenho operacional do sistema.
Placa de latão <i>(Brassboard)</i>	Modelo funcional de média fidelidade, adequado para testes de campo que, geralmente, replica a função e a configuração dos sistemas operacionais, com exceção dos aspectos não essenciais. Ele não tem o <i>pedigree</i> de uma peça de engenharia em todos os seus aspectos, mas é estruturado para operar em ambientes operacionais simulados, de modo a avaliar o desempenho de funções críticas dos elementos.
Protótipo <i>(Prototype)</i>	Unidades (maquetes ou modelos) construídas no início do ciclo de vida do projeto, capazes de demonstrar a forma, a configuração e a função do sistema final. O protótipo pode ser considerado como o primeiro modelo de engenharia, embora não apresente a qualidade ou o estado de uma peça de engenharia, nem os dados necessários para apoiar sua utilização em ambientes fora de um ambiente controlado. Ele é construído para ser um modelo representativo do sistema operacional, capaz de executar testes de desempenho para abordar questões críticas em escala real e para testar os processos de fabricação, de modo que a experiência adquirida com o protótipo possa alimentar as alterações de <i>design</i> que irão melhorar a produção, integração e manutenção de um único ou de vários elementos.
Requisito <i>(Requirement)</i>	Condição acordada para satisfazer uma necessidade, capacidade, ou demanda de pessoal, equipamentos, instalações ou outros recursos ou serviços, por quantidades especificadas, para períodos fixos de tempo, em um momento determinado, imprescindível para a consecução de certo fim. Forma aceitável para que uma declaração de exigência seja individualmente clara, correta, viável de se obter, sem ambiguidades em seu significado, e que possa ser validada na estrutura do sistema para o qual declarou. Em pares de declarações de exigências, ou como um conjunto de declarações, elas não são redundantes, estão adequadamente relacionadas aos termos utilizados, e não estão em conflito uma com a outra.

TERMO	DESCRIÇÃO
Sistema (<i>System</i>)	(1) A combinação de elementos que funcionam em conjunto para produzir a capacidade de responder a uma necessidade. Os elementos incluem o <i>hardware</i> , <i>software</i> , equipamento, instalações, pessoal, processos e procedimentos necessários para produzir o efeito. (2) O elemento final (que desempenha funções operacionais) e os elementos meios (que fornecem serviços de apoio do ciclo de vida para os produtos operacionais finais) que compõem um sistema.
Subsistema (<i>Subsystem</i>)	Montagem de unidades funcionalmente relacionadas e interligadas. Por exemplo, o subsistema de energia elétrica.
Validação (<i>Validation</i>)	Testes para determinar que um dispositivo foi construído de acordo com a totalidade dos seus requisitos prescritos por qualquer método adequado. Os testes podem ser realizados sob condições reais ou simuladas. A validação pode ser determinada por uma combinação de ensaio, análise e demonstração por meio de evidências objetivas.
Verificação (<i>Verification</i>)	Processo para provar ou demonstrar por meio de testes que um produto acabado atende a seus requisitos funcionais e ambientais. A verificação pode ser determinada por uma combinação de ensaio, análise, demonstração ou inspeção
Unidade (<i>Unit</i>)	Um item funcional completo e separado do sistema, que se encontra no nível mais baixo da estrutura analítica do projeto. Por exemplo, uma válvula.

Fontes: Traduzido e adaptado (BILBRO, 2001; NASA, 2007, 2008, 2013)..

APÊNDICE D - Minuta de carta convite para entrevistas.

Rio de Janeiro, __ de maio de 2016

COR/LTDS/LSL/Nº ___/2016

Ao
Ilmo. Sr.
(Professor)
(Endereço)

Ref.: Participação em procedimento de pesquisa científica

Prezado Sr. (Professor) _____,

Cumprimentando-o cordialmente, vimos, pela presente, convidar V.Sa. a participar da pesquisa sobre Níveis de prontidão de tecnologia e o projeto MagLev-Cobra, realizada sob a nossa responsabilidade, para o curso de mestrado acadêmico do Programa de Engenharia de Produção – PEP, do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa – Coppe, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. A pesquisa abrange a área de Gestão e Inovação, e tem como objetivo promover um estudo pragmático do projeto MagLev-Cobra, mediante a análise dos níveis de prontidão de tecnologia (TRLs).

Desse modo, sua participação é voluntária, e consistirá de __ (___) entrevista com perguntas e respostas abertas sobre o projeto MagLev-Cobra, a serem realizadas da seguinte forma:

(a) uma entrevista individual a ser realizada no dia __ de maio de 2016, às _____ horas, no Lasup – Laboratório de Aplicações de Supercondutores do Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, UFRJ, Ilha do Fundão, com duração de até 2 (duas) horas para perguntas abertas sobre sua participação no projeto em estudo;

(b) uma entrevista em grupo a ser realizada no dia __ de maio de 2016, às _____ horas, na sala _____, _____, Cidade Universitária, UFRJ, Ilha do Fundão, com duração de até 2 (duas) horas para debate sobre o projeto MagLev-Cobra.

As entrevistas serão filmadas, fotografadas e/ou gravadas em áudio e vídeo, podendo ser editadas e disponibilizadas com os demais dados da pesquisa, em sítio eletrônico na internet e/ou publicada para fins acadêmicos e científicos.

Caso V.Sa. concorde em participar dessa pesquisa, pedimos a gentileza de confirmar sua presença, e de nos encaminhar o Termo de autorização de identificação e de uso de imagem e depoimentos em anexo, devidamente preenchido e assinado.

Agradecemos, desde já, a compreensão e colaboração de V.Sa. no processo de desenvolvimento dessa pesquisa, e colocamo-nos à disposição para prestar os esclarecimentos adicionais acaso necessários.

Atenciosamente,

Luiza Maria da Silveira Lobo
Aluna do mestrado – PEP

APÊNDICE E - Minuta de termo de autorização de identificação e de uso de imagem e depoimentos.

Eu, _____, portador(a) do RG. nº _____, inscrito(a) no CPF sob o nº _____, declaro, para os devidos fins, que aceito participar da pesquisa sobre Níveis de prontidão de tecnologia e o projeto MagLev-Cobra, para a dissertação de mestrado acadêmico, na área de Gestão e Inovação, do Programa de Engenharia de Produção PEP, do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa – Coppe, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, desenvolvida pela pesquisadora Luiza Maria da Silveira Lobo, sob a orientação do professor Roberto dos Santos Bartholo Junior.

Os trabalhos de pesquisa compreendem a realização de entrevistas que serão fotografadas, filmadas e gravadas em áudio e vídeo, visando uma reflexão contextualizada do processo de reconstrução da realidade a ser pesquisada. Reconheço que minha participação na pesquisa é voluntária e consistirá em conceder até 3 (três) entrevistas individuais ou em grupo, em local privado ou público, sendo certo que, a qualquer momento durante a realização dos eventos, poderei me recusar a responder qualquer pergunta ou desistir de continuar a participar, retirando meu consentimento, sem nenhum tipo de penalidade, constrangimento ou prejuízo a minha pessoa. Declaro, neste ato, que tenho pleno conhecimento sobre a pesquisa e seus procedimentos metodológicos.

Autorizo a reprodução e o uso do material e das informações, obtidos em fotografias, filmagens ou gravações resultantes de minha participação na pesquisa, para que possam ser apresentados em atividades acadêmicas e científicas, como aulas, seminários, congresso, ou palestras, bem como utilizados em relatórios e na divulgação audiovisual do referido estudo, além de livros acadêmicos, periódicos científicos, artigos publicados em anais de encontros científicos, nacionais e internacionais, assim como disponibilizados em banco de dados e imagens sobre a pesquisa e na internet. A pesquisadora responsável fica autorizada a executar livremente a edição e montagem

das fotos, filmagens e gravações de minha imagem e voz, bem como do material e das informações resultantes de minha participação na pesquisa, conduzindo as reproduções que entender necessárias, devendo sempre indicar clara e expressamente sua origem e autoria.

A presente autorização é concebida a título gratuito, abrangendo o uso de minhas imagem e voz, bem como a produção e editoração de materiais e informações resultantes de minha participação na pesquisa, conforme acima mencionados, a serem distribuídos e veiculados – em exposições públicas e privadas, no Brasil ou no exterior, por todo e qualquer veículo, processo ou meio de comunicação existente, desde que respeitados os fins aqui estabelecidos. Todos os registros efetuados nas entrevistas, resultante de minha participação na pesquisa, serão usados, de forma não exclusiva, para fins acadêmico-científicos, e ficarão sob a propriedade da Coppe/UFRJ e da pesquisadora responsável, devendo ser disponibilizados em endereço eletrônico na internet.

Por este Termo de autorização de identificação e de uso de imagem e depoimentos ser a expressão da minha vontade, declaro, para os devidos fins, que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à imagem, às produções ou a qualquer outro, e assino o presente em 2 (duas) vias de igual teor e forma.

Rio de Janeiro,de de 2016.

Nome completo do entrevistado

APÊNDICE F - Minuta de termo de confidencialidade e sigilo

Eu, (nome), (nacionalidade), (estado civil), (profissão), inscrito(a) no CPF sob o nº 000.000.000-00, na qualidade de estudante e pesquisadora do curso de mestrado acadêmico do Programa de Engenharia de Produção (PEP), do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a seguir “signatário(a)”, assumo o compromisso de manter a confidencialidade e o sigilo sobre todo e qualquer dado, informação e/ou conhecimento tecnológico, relacionado ao Projeto MagLev-Cobra, para a construção de um trem urbano de Levitação Magnética Supercondutora (SML), desenvolvido pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores (Lasup), sob a coordenação do professor Richard Magdalena Stephan.

Para os efeitos deste Termo, considera-se:

a) **Confidencial:** todo e qualquer dado, informação ou conhecimento tecnológico obtido por meio de operações, processos, planos ou intenções sobre produção, instalações, equipamentos, sistemas, dados, habilidades especializadas, projetos, métodos e metodologia, fluxogramas, especializações, componentes, fórmulas, plantas, produtos e questões relativas às atividades desempenhadas no âmbito do Lasup para o Projeto MagLev-Cobra.

b) **Dado:** o elemento ou a quantidade dele que servir de base à resolução de um problema; os números de uma amostra que têm as características definidas por um subconjunto do domínio de uma variável aleatória ou não; resultados de exames, testes, ensaios realizados pelo Lasup para o Projeto MagLev-Cobra.

c) **Informação:** o conjunto de dados logicamente concatenados para esclarecimentos acerca de procedimento para utilização do conhecimento sobre a construção do trem urbano de levitação magnética supercondutora, objeto do Projeto MagLev-Cobra.

d) **Conhecimento:** o saber científico ou tecnológico, domínio teórico ou prático, desenvolvido pelo Lasup especificamente para o Projeto MagLev-Cobra.

e) Tecnológico: o conjunto de instrumentos, métodos e processos específicos; o estudo sistemático das matérias-primas e dos procedimentos e equipamentos técnicos desenvolvidos pelo Lasup para a realização do Projeto MagLev-Cobra.

f) Projeto MagLev-Cobra ou simplesmente Projeto: o conjunto de atividades realizadas pelo Lasup, visando a gerar conhecimento, informação ou dado, cujo resultado esperado é o desenvolvimento da tecnologia SML e/ou a construção de um trem urbano de levitação magnética.

Por este Termo de confidencialidade e sigilo, o(a) signatário(a) obriga-se a:

1. Utilizar dados, informações e conhecimentos tecnológicos sobre o Projeto MagLev-Cobra que, por ventura, vir a ter acesso para gerar benefício próprio, presente ou futuro, somente com a expressa autorização, por escrito, do coordenador, professor Richard Magdalena Stephan.
2. Efetuar qualquer gravação ou cópia de documentação confidencial e sigilosa que lhe tenha sido transmitida pela Coppe/UFRJ e/ou pela equipe do Lasup, relacionada à tecnologia desenvolvida pelo Projeto MagLev-Cobra, somente com a autorização expressa do coordenador, professor Richard Magdalena Stephan.
3. Solicitar autorização expressa, por escrito, ao coordenador, professor Richard Magdalena Stephan, para publicar resultados do Projeto MagLev-Cobra em sua dissertação de mestrado acadêmico, artigo, folheto ou relatório;
4. Não apropriar-se para si ou para outrem de material confidencial e/ou sigiloso sobre a tecnologia relacionada ao Projeto MagLev-Cobra, que venha a ser disponibilizada pela equipe do Lasup.
5. Não repassar para terceiros dado, informação ou conhecimento confidencial que venha a ter acesso, obrigando-se a ressarcir a ocorrência de qualquer dano e/ou prejuízo oriundo de uma eventual quebra de sigilo.

A obrigação de sigilo ora assumida não prevalece sobre dados, informações e conhecimentos tecnológicos que estejam sob domínio público ou que venham a se

tornar públicos mediante divulgação pela Coppe/UFRJ ou qualquer membro da equipe do Lasup, pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), ou por instituto competente em âmbito internacional.

Assim, por considerar válida e eficaz a obrigação unilateral aqui expressa, firma o(a) signatário perante as testemunhas abaixo o presente instrumento, em duas vias de igual teor e forma, para que produza os efeitos legais.

Rio de Janeiro ____ de _____ de 20__.

Nome completo do signatário
CPF e assinatura

Testemunhas:

Nome completo
CPF e assinatura

Nome completo
CPF e assinatura

APÊNDICE G - Minuta de roteiros de questões-chave

1. Qual a sua especialização e quais atividades você desempenha no LASUP?
2. Quando você integrou a equipe?
3. Os princípios básicos foram observados e relatados?
4. A prova de conceito foi formulada? Qual foi a sua participação nessa fase do projeto?
5. Como foi realizado o teste em escala de laboratório? Esse teste foi concluído em um ambiente simulado?
6. Em que condições foram realizados os testes do protótipo funcional no Hangar do Bloco I-2000?
7. Como ocorreu a demonstração do módulo operacional e da pista experimental durante a MAGLEV'2014?
8. Qual o módulo operacional está funcionando durante essa fase de testes?
9. Quais os próximos passos para o projeto?

APÊNDICE H - Minuta de relatório de dados

Relatório de Documentação		Código:	
Data do Relatório:	Tipo de Documento:	Data do Documento:	
Título e Subtítulo:		NºPágs.:	
Autor(es)/Parte(s):		Nº Doc.:	
		Programa:	
Nome da Organização:		Laboratório:	
		Projeto Nº:	
Endereço:		Nome do Responsável:	
		Organização Nº:	
Entidade Financiadora:		Data Doc.:	
Tipo de Financiamento:	Valor:	Período:	
Referências Bibliográficas:			
Notas Complementares:			
Resumo:			
Termos/Assunto:			
Classificação do Conteúdo:			
Edição:	Vol.:	Série:	Nº Pág.