

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

RAISSA GUERRA RESENDE

**COMPLEXIDADE EM PROJETOS DE NANOTECNOLOGIA: caracterização e
proposição de um *template* de análise**

Belo Horizonte

2023

Raissa Guerra Resende

**COMPLEXIDADE EM PROJETOS DE NANOTECNOLOGIA: caracterização e
proposição de um *template* de análise**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica.

Área de concentração: Gestão da Inovação, Propriedade Intelectual e Empreendedorismo.

Orientador: Dr. Raoni Barros Bagno

Belo Horizonte

2023

Ficha Catalográfica

R433c Resende, Raissa Guerra.
2023 Complexidade em projetos de nanotecnologia [manuscrito] : caracterização e
T proposição de um template de análise / Raissa Guerra Resende. 2023.
1 recurso online (234 f. : il., gráfs., tabs., color.) : pdf.

Orientador: Raoni Barros Bagno.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de
Química (Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica).

Bibliografia: f. 168-187.

Apêndices: f. 188-234.

1. Inovações tecnológicas – Teses. 2. Nanotecnologia – Teses. 3. Pesquisa e desenvolvimento – Teses. 4. Projetos de pesquisa – Teses. 5. Projetos – Avaliação – Teses. 6. Projetos – Elaboração – Teses. 7. Administração de projetos – Teses. I. Bagno, Raoni Barros, Orientador. II. Título.

CDU 043



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Exatas - ICEx
Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica

ATA DA SESSÃO DE DEFESA DA 34ª TESE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, DA DISCENTE RAISSA GUERRA RESENDE, Nº DE REGISTRO 2019754554.

Aos 15 (quinze) dias do mês de dezembro de 2023, às 08:30 horas, online, via Plataforma Microsoft Teams, reuniu-se a Comissão Examinadora composta pelos Professores Doutores: Raoni Barros Bagno do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG (Orientador), Vinícius Chagas Brasil da Universidade de São Paulo - USP, Jonathan Simões Freitas da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Wesley Canedo de Souza Junior da Universidade Federal do Rio Grande do Norte- UFRN, Reginaldo de Jesus Carvalho Lima do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG e Juliana Corrêa Crepalde Medeiros do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG, para julgamento da Tese de Doutorado em Inovação Tecnológica - Área de Concentração: Gestão da Inovação, Propriedade Intelectual e Empreendedorismo da discente Raissa Guerra Resende, Tese intitulada: **“Complexidade em projetos de nanotecnologia: caracterização e proposição de um template de análise.”** O Presidente da Banca abriu a sessão e apresentou a Comissão Examinadora, bem como esclareceu sobre os procedimentos que regem da defesa pública de tese. Após a exposição oral do trabalho pela discente e arguição pelos membros da Banca Examinadora na ordem registrada acima, com a respectiva defesa da candidata. Finda a arguição, a Banca Examinadora se reuniu, sem a presença da discente e do público, tendo deliberado unanimemente pela sua **APROVAÇÃO**. Nada mais havendo para constar, lavrou-se e fez a leitura pública da presente Ata que segue assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora e pelo coordenador do Programa. Belo Horizonte, 15 de dezembro de 2023.

Professor Doutor Raoni Barros Bagno (Orientador)

(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Vinícius Chagas Brasil

(Universidade de São Paulo - USP)

Professor Doutor Jonathan Simões Freitas

(Universidade Federal de Minas Gérias - UFMG)

Professor Doutor Wesley Canedo de Souza Junior

(Universidade Federal do Rio Grande do Norte- UFRN)

Professor Doutor Reginaldo de Jesus Carvalho Lima
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professora Doutora Juliana Corrêa Crepalde Medeiros
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Allan Claudius Queiroz Barbosa
Coordenador do PPG em Inovação Tecnológica da UFMG



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo de Jesus Carvalho Lima, Usuário Externo**, em 03/01/2024, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Chagas Brasil, Usuário Externo**, em 03/01/2024, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonathan Simoes Freitas, Professor do Magistério Superior**, em 03/01/2024, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Correa Crepalde Medeiros, Cidadã**, em 03/01/2024, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raoni Barros Bagno, Professor do Magistério Superior**, em 04/01/2024, às 13:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allan Claudius Queiroz Barbosa, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 04/01/2024, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Canedo de Souza Junior, Usuário Externo**, em 09/01/2024, às 16:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2877350** e o código CRC **83BF98AD**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Exatas - ICEx
Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica

“COMPLEXIDADE EM PROJETOS DE NANOTECNOLOGIA: CARACTERIZAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE UM TEMPLATE DE ANÁLISE.”

RAISSA GUERRA RESENDE, Nº DE REGISTRO 2019754554

Tese **Aprovada** pela Banca Examinadora constituída pelos Professores Doutores:

Professor Doutor Raoni Barros Bagno (Orientador)
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Vinícius Chagas Brasil
(Universidade de São Paulo - USP)

Professor Doutor Jonathan Simões Freitas
(Universidade Federal de Minas Geras - UFMG)

Professor Doutor Wesley Canedo de Souza Junior
(Universidade Federal do Rio Grande do Norte- UFRN)

Professor Doutor Reginaldo de Jesus Carvalho Lima
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professora Doutora Juliana Corrêa Crepalde Medeiros
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Allan Claudius Queiroz Barbosa

Belo Horizonte, 15 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo de Jesus Carvalho Lima, Usuário Externo**, em 03/01/2024, às 10:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Chagas Brasil, Usuário Externo**, em 03/01/2024, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonathan Simoes Freitas, Professor do Magistério Superior**, em 03/01/2024, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Correa Crepalde Medeiros, Cidadã**, em 03/01/2024, às 12:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raoni Barros Bagno, Professor do Magistério Superior**, em 04/01/2024, às 13:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allan Claudius Queiroz Barbosa, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 04/01/2024, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Canedo de Souza Junior, Usuário Externo**, em 09/01/2024, às 16:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2877367** e o código CRC **9A686DCA**.

*À minha mãe, Mônica Goulart
Guerra, ao meu pai, Maurílio de
Oliveira Resende, e à minha
eterna amada, Nina (filha de
três patas).*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos aqueles que abriram mão da minha presença para tornar possível o desenvolvimento desta tese: mãe, pai, avó, filhos de quatro e três patas, namorado, irmãos, amigos e colegas de trabalho. Expresso também minha gratidão a todos que contribuíram para a realização deste estudo, em especial ao meu orientador excepcional, aos codificadores independentes mais dedicados, os entrevistados do CTNano/UFMG e todos os membros da banca de qualificação e banca final.

RESUMO

A nanotecnologia (NT) é vista como um dos campos mais promissores do século XXI e tem atraído forte interesse de governos, setor privado e academia, recebendo investimentos expressivos para seu desenvolvimento. Entretanto, as taxas de sucesso de projetos de pesquisa e desenvolvimento nessa área e, conseqüentemente, a comercialização efetiva de produtos nanotecnológicos ainda frustram as projeções realizadas. Reconhecendo que projetos nesse campo possuem diversas particularidades e trazem fortes elementos de complexidade, o presente estudo busca responder à questão: como caracterizar complexidade em projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de nanotecnologia? Para isso, parte-se da literatura de NT e gerenciamento de projetos complexos, incorporando dados reais de projetos inseridos no contexto de estudo. Aplica-se como abordagem metodológica o *flexible pattern matching*, que contrapõe complexidades potenciais previamente identificadas na literatura com dados de campo obtidos a partir de 14 projetos de um Centro de Tecnologia em Nanomateriais. O resultado é a construção de um *template* com os elementos de complexidade mais significativos em projetos nesta área, formado por 56 elementos agrupados em sete categorias. Este *template* se propõe a ser um instrumento de análise para diagnóstico e prognóstico de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação em NT, que auxilia a identificar complexidades potencialmente influentes no andamento destes projetos e que, se não tratadas, podem reduzir suas possibilidades de sucesso. Como contribuições centrais, o estudo oferece uma abordagem sistemática e teoricamente fundamentada da dinâmica de projetos para o carente campo de NT, e enriquece o debate rico, porém, generalista sobre complexidade em projetos ao desenvolver um *template* de referência que dialoga com complexidades reais de um contexto emergente e promissor para estudos de gestão.

Palavras-chave: nanotecnologia; complexidade em projetos; *flexible pattern matching*; pesquisa, desenvolvimento e inovação.

ABSTRACT

Nanotechnology (NT) is seen as one of the most promising fields of the 21st century and has attracted strong interest from governments, the private sector, and academia, receiving significant investments for its development. However, the success rates of research and development projects in this area and, consequently, the effective commercialization of nanotechnological products still fall short of projections. Recognizing that projects in this field have various particularities and involve strong elements of complexity, this study seeks to answer the question: how to characterize complexity in research, development, and innovation projects in the field of nanotechnology? To do so, it draws from the literature on NT and complex project management, incorporating real data from projects within the study's context. The methodological approach applied is flexible pattern matching, contrasting potential complexities identified in the literature with field data obtained from 14 projects at a Nanomaterial Technology Center. The result is the construction of a *template* with the most significant elements of complexity in projects in this area, consisting of 56 elements grouped into seven categories. This *template* aims to be an analytical tool for the diagnosis and prognosis of research and development projects in NT, helping to identify potentially influential complexities in the progress of these projects that, if left untreated, may reduce their chances of success. As central contributions, the study offers a systematic and theoretically grounded approach to the dynamics of projects in the underserved field of nanotechnology. It enriches the rich but general discourse on complexity in projects by developing a reference *template* that engages with real complexities in an emerging and promising context for management studies.

Keywords: nanotechnology; project complexity; flexible pattern matching; research, development and innovation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia de Valor da Nanotecnologia	33
Figura 2 - Receita prevista para o mercado de produtos nanotecnológicos	36
Figura 3: Atualização da previsão de receita para o mercado de produtos nanotecnológicos	37
Figura 4: Posição das empresas de materiais avançados na cadeia de valor.	49
Figura 5: <i>Spiral product development</i>	51
Figura 6: Evolução do valor dos desenvolvimentos em biotecnologia ao longo do tempo	54
Figura 7: Evolução do valor dos desenvolvimentos em nanotecnologia ao longo do tempo	54
Figura 8: Fatores críticos para o sucesso da comercialização de NTs	57
Figura 9: Escala TRL de acordo com Mankins (2009)	61
Figura 10: Tipos de complexidade - tarefas, social, cultural e geral do projeto	78
Figura 11: Três categorias de complexidade e causas associadas	80
Figura 12: Foto do CTNano/UFMG	93
Figura 13: <i>Flexible pattern matching approach</i>	100
Figura 14: Estrutura de dados em três níveis	103
Figura 15: Estruturação do <i>flexible pattern matching</i> para a condução do estudo em blocos	105
Figura 16: Protocolo de Entrevistas - Preparação da Entrevista	110
Figura 17: "Aumento de escala de produção e reprodutibilidade" nos <i>templates</i> teórico, empírico e final	127

Figura 18: "Tamanho do projeto" no <i>template</i> teórico, empírico e final.	130
Figura 19: "Caracterização" no <i>template</i> teórico, empírico e final.	133
Figura 20: " <i>Science-based business</i> " nos <i>templates</i> teórico, empírico e final	134
Figura 21: " <i>Variáveis técnicas e pivotagem</i> " nos <i>templates</i> teórico, empírico e final	136
Figura 22: "Cadeia de valor" nos <i>templates</i> teórico, empírico e final.	137
Figura 23: TRL e ciclo de vida do produto	140
Figura 24: Gráfico de radar que ilustra de forma comparativa a potencial complexidade do projeto de acordo com as duas possibilidades de inclusão do Grupo C	152
Figura 25: Explicação de como um desenvolvimento tecnológico está localizado dentro da cadeia de valor da nanotecnologia	163
Figura 26: Imagem do e-commerce da Nanoview Nanotecnologia que mostra que o "pó preto" corresponde a milhares de nanotubos funcionalizados e, ao mesmo tempo, disponibiliza uma imagem de microscopia eletrônica de varredura como um zoom do que o cliente está vendo	163
Figura 27: Comparação entre um fio de cabelo e um nanofio de prata	164
Figura 28: Print do vídeo que ilustra uma das etapas do processo de scale-up de produção dos sensores nanoestruturados	164
Figura 29: Print do vídeo ilustrativo do protótipo da aplicação de um sensor nanoestruturado em um braço robótico	165
Figura 30: Cenários de complexidade e potenciais ações a se considerar	166
Figura 31: Exemplo de edital do Sibratec Nano que tem o TRL como critério de seleção	188
Figura 32: Exemplo de edital Finep que tem o TRL como critério de seleção	189

Figura 33: Exemplo de edital Embrapii que tem o TRL como critério de seleção e utilizará, inclusive, para avaliar projetos de nanotecnologia	190
Figura 34: Exemplo de edital do CNPq que tem o TRL como critério de classificação e avaliação de projetos (inclusive de Nanotecnologia)	190
Figura 35: Adaptação da escala TRL aplicada ao setor da saúde, segundo a EARTO (2014)	191
Figura 36: Níveis de Prontidão de Manufatura Inovadores	196
Figura 37: Diferença TRL e MRLs	200
Figura 38: <i>Innovation Readiness Levels</i>	201
Figura 39: Comparação TRL, RRL e TRML	202
Figura 40: TRL PROD	202
Figura 41: Comparativo TRL e CRI	204
Figura 42: Calculadora TRL	204
Figura 43: Escala TRL utilizada pela Comissão Europeia	208

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Projeções sobre a inserção de produtos nanotecnológicos no mercado	38
Quadro 2: Características dos desenvolvimentos em NT	58
Quadro 3: Escala TRL utilizada pelo programa <i>Horizon 2020</i>	65
Quadro 4: Elementos identificados na literatura que contribuem para a complexidade do projeto	78
Quadro 5: Principais fatores que afetam a complexidade de um projeto	80
Quadro 6: Fontes de complexidade e exemplo de autores que as abordam na literatura	87
Quadro 7: Aspectos que respaldam "trustworthiness" na pesquisa qualitativa	98
Quadro 8: Exemplo de estrutura de dados e abordagem para controle de qualidade	104
Quadro 9: Entrevistados no CTNano/UFMG	107
Quadro 10: Características dos projetos e entrevistados	109
Quadro 11: Recorte do <i>template</i> teórico (Bloco A)	117
Quadro 12: Recorte do <i>template</i> empírico (Bloco B)	118
Quadro 13: Recorte do <i>template</i> final (Bloco C): macro-elementos de complexidade e suas definições	121
Quadro 14: Recorte do <i>Template</i> Final resultado do (Bloco C): desdobramento dos macro-elementos de complexidade	122
Quadro 15: Elementos de complexidade (coloridos em amarelo) que estariam presentes caso o grupo C fosse incluído como partícipe do projeto	149
Quadro 16: Elementos de complexidade (diferenciados em amarelo e amarelo claro) que estariam presentes caso o grupo C fosse prestador de serviços	150

Quadro 17: Análise de complexidade do projeto de acordo com a forma de inclusão do Grupo C	152
Quadro 18: Elementos de complexidade mapeados com base no cenário hipotético apresentado	154
Quadro 19: Escala TRL adaptada para a indústria química	195
Quadro 20: Aplicação da escala TRL para em editais Embrapii para avaliação de projetos	198
Quadro 21: Escala MRL	200
Quadro 22: Detalhamento da escala TRL utilizada pelo programa <i>Horizon 2020</i>	207
Quadro 23: Estratégia de detalhamento da escala TRL preconizada pelo Sibratec Nano	208
Quadro 24: Template de elementos de complexidade gerado a partir das literaturas de NT e CP	211
Quadro 25: Template resultante da codificação realizada pelos CIs	220

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Meios para estabelecer "trustworthy" na pesquisa qualitativa	99
Tabela 2: Software Technology Readiness Levels	194
Tabela 3: Hardware Technology Readiness Levels	194
Tabela 4: Department of Transportation Technology Readiness Levels	193
Tabela 5: Technology Readiness Levels	194
Tabela 6: Integration Readiness Level (IRL)	206
Tabela 7: System Readiness Level (SRL)	206

LISTA DE ABREVIATURAS

AFRL - U.S. Air Force Research Laboratory

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CI - Codificador Independente

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CP - Complexidade em projetos

CRI - Commercial Readiness Index

CTIT – Coordenadoria de Transferência e Inovação Tecnológica

CTNano/UFMG - Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da Universidade Federal de Minas Gerais

EMBRAPII - Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial

Finep - Financiadora de Estudos e Projetos

FCO - Fundação Christiano Ottoni

FUNDEP - Fundação de Apoio da UFMG

FUNTEC - Fundo Tecnológico

IBN - Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia

ICT - Instituto de Ciência e Tecnologia

ICCPM - International Center for Complex Project Management

INCT - Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia

IRLs - Integration Readiness Levels

IRLs - Innovation Readiness Levels

MRLs - Manufacturing Readiness Levels

MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NIT – Núcleo de Inovação Tecnológica

NT - Nanotecnologia

NNI - National Nanotechnology Initiative

PD&I - Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

PINTEC - Pesquisa Industrial de Inovação Tecnológica

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PMI - Project Management Institute

Sibratec NANO - Centros de Inovação em Nanotecnologia

SisNANO - Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias

SMS – Saúde, Meio Ambiente e Segurança

SNI - Sistema Nacional de Inovação

SRL - System Readiness Levels

TPG – Tecnologia de Propósito Geral

TRL - Technology Readiness Level

TRML - Technology, Regulatory and Market Readiness Level

TRLPROD - Technology Readiness Level of the Product

U-E - Universidade e Empresa

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	23
2 NANOTECNOLOGIA E AVALIAÇÃO DE PROJETOS.....	32
2.1 O que é nanotecnologia.....	32
2.2 Investimentos, mercado e comercialização da NT.....	33
2.3 Peculiaridades dos desenvolvimentos na área de NT	39
2.4 Projetos de PD&I em NT e a escala TRL	59
3 GERENCIAMENTO DE PROJETOS COMPLEXOS	68
3.1 O que é complexidade em projetos.....	69
3.2 Tipos de complexidade em projetos	73
3.3 Fontes de complexidade em projetos	76
4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	89
5 METODOLOGIA.....	93
5.1 O Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da UFMG.....	93
5.2 Abordagem metodológica escolhida: <i>flexible pattern matching</i>	97
5.2.1 <i>Pesquisa qualitativa: confiabilidade e validade</i>	97
5.2.2 <i>Flexible pattern matching como estratégia metodológica</i>	99
5.3 Condução do estudo	104
5.3.1 <i>Bloco A - Padrão teórico</i>	105
5.3.2 <i>Bloco B - Padrão empírico</i>	107

5.3.3 Bloco C - Template final	113
5.3.4 Controle de qualidade	113
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	117
6.1 Apresentação dos resultados	117
6.2 Discussão e análise do <i>template</i> final	126
6.2.1 Exemplos de convergências e complementaridades entre complexidades identificadas na literatura e no ambiente de campo.....	126
6.2.2 Exemplos complexidades identificadas na literatura, mas não foram abordadas nas entrevistas de campo	137
6.2.3 Utilização do template de elementos de complexidade de forma estratégica no planejamento, execução e avaliação de projetos de nanotecnologia.....	143
6.3 Implicações do estudo	155
6.3.1 Implicações para as literaturas de NT, gestão de projetos e <i>flexible pattern matching</i>	155
6.3.2 Implicações para gestores de projetos na área de NT.....	160
6.3.3 Implicações para os financiadores de iniciativas na área de NT.	166
7 CONCLUSÃO	169
REFERÊNCIAS	173
APÊNDICE 1 – Informações adicionais sobre a escala TRLs.....	188
APÊNDICE 2 – Template preliminar gerado com base nas literaturas estudadas.....	210

APÊNDICE 3 – Template gerado pelos codificadores independentes com base nos dados empíricos	218
--	------------

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

As organizações têm feito investimentos substanciais em tecnologias de ponta, com o objetivo de obter vantagens competitivas em mercados extremamente dinâmicos (GOMES; ROMÃO, 2016; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019). Uma das tecnologias de ponta que mais prometem moldar o mercado mundial são as nanotecnologias (MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012). A Nanotecnologia (NT) é vista como uma das tecnologias mais promissoras do século XXI (PETERSON et al., 2020; SHEA; GRINDE; ELMSLIE, 2011), por prometer melhorias significativas no ramo de materiais avançados e técnicas manufatura, fundamentais para a competitividade industrial (MIYAZAKI; ISLAM, 2007).

A literatura científica postula que a NT deve ser considerada como Tecnologia de Propósito Geral (TPG), devido ao seu grande potencial de difusão, transversalidade, de dinamismo tecnológico e de indução de inovações onde for aplicada (KREUCHAUFF; TEICHERT, 2014). Como as demais TPGs, a NT é intensiva em conhecimento e está associada com um alto nível de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (EUROPEAN COMMISSION, 2021). Por ser uma área tecnológica estratégica, a NT atrai forte interesse dos governos, do setor privado e da academia, que passaram a investir intensivamente no seu desenvolvimento (BELLUCCI; VASQUEZ; CONTI, 2021; MCTIC, 2020; NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE, 2021; STATNANO, 2019; WANG; JACOB; LI, 2019).

Entretanto, mesmo com investimento em escala crescente, a comercialização de produtos baseados em NT frustra projeções e expectativas levantadas neste campo (AITHAL; AITHAL, 2015, 2016a, 2016b; KOSHOVETS; GANICHEV, 2016; RENN; ROCO, 2006), pois é vista como muito lenta (MAINE, 2013b). Tal situação ainda é corroborada por estudos mais recentes, que reconhecem que os esforços nas atividades de pesquisa superam substancialmente os esforços voltados à comercialização dos nanoproductos (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

Como exemplo, Aithal e Aithal (2016a) compararam projeções com base no montante de investimentos aportados para viabilizar o desenvolvimento e inserção de produtos nanotecnológicos no mercado. Uma delas é a de Renn e Rocco (2006) que previam a terceira geração de NTs, integração entre nanosistemas, para 2010-2015. Tal previsão foi atualizada por Aithal (2015) para 2020-2035.

Outros estudos também corroboram com este atraso nas previsões. Como exemplo, temos Koshovets e Ganichev (2016, 2017), que compararam projeções de receita dos produtos nanotecnológicos apresentadas pela LUX Research, empresa de pesquisa com maior autoridade na área. Koshovets e Ganichev (2016) evidenciam que em 2008 era previsto pela LUX Research que o volume total do mercado de produtos nanotecnológicos ultrapassasse 3 bilhões de dólares em 2015. No entanto, tal projeção foi atualizada em 2013, indicando que este valor não seria alcançado antes de 2018 (KOSHOVETS; GANICHEV, 2016).

Recentemente, por mais que sejam reconhecidos avanços consideráveis em pesquisas na área de NT, a comercialização de produtos disruptivos previstos nas projeções de mercado ainda não foram amplamente alcançadas, o que pode ser visto, por exemplo, a partir de estudos que evidenciam novas barreiras e desafios não transpassados (DUNN, 2020; MAIRA; ETXABE; SERENA, 2018; MUFAMADI, 2019; RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

Os dados acima incitam uma reflexão crítica sobre o *hype*¹ da NT e como os esforços do governo e das organizações que lidam com a pesquisa em NT poderiam ser mais efetivos nesta área (AITHAL; AITHAL, 2016a; ALVIAL-PALAVICINO; KONRAD, 2019; CAO; APPELBAUM; PARKER, 2013; KOSHOVETS; GANICHEV, 2016, 2017; NASERI; DAVOODI, 2011). Diante das grandes expectativas em relação a esta área, fica claro que para que os projetos de NT desempenhem um papel vital na modernização de mercados, é necessário um acompanhamento diferenciado para que estes sejam bem sucedidos (ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019).

Este cuidado é extremamente importante já que as particularidades da inovação nesta área emergente (MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012) fazem com que os empreendimentos em NT (como negócios baseados na ciência) sejam muito diferentes dos empreendimentos de tecnologia mais amplamente estudados, como

¹ *Hype* em NT refere-se ao exagero ou à promoção excessiva de tecnologias ou aplicações relacionadas à NT, muitas vezes sem uma base científica sólida ou com expectativas infladas sobre seus benefícios e impactos reais. É uma situação em que as possibilidades e promessas da NT são exageradas de maneira a criar uma empolgação desproporcional, muitas vezes levando a uma maior atenção da mídia e do público do que o suportado pelos resultados científicos concretos (BERUBE, 2006).

aqueles construídos para explorar desenvolvimentos tecnológicos em eletrônicos, computadores e *software* (BELCHER et al., 2013; REISS; HJELT; FERRARI, 2017).

Como exemplo, especificamente na indústria de materiais, historicamente as inovações são caracterizadas por longos períodos de gestação entre a invenção e a chegada da inovação no mercado (MAINE, 2000; REISS; HJELT; FERRARI, 2017). Segundo Maine (2016) inovações em materiais avançados, levam tipicamente entre 5 e 15 anos para gerar um produto comercial, e podem demorar ainda mais para penetrar em múltiplos mercados. Por outro lado, empresas de tecnologia convencionais gastam cerca de dois anos do momento em que tiveram a ideia inicial até ter sua primeira venda (CARTER et al., 2003)

Neste cenário, pode-se dizer que fracassos e frustrações em projetos de NT ocorrem por várias razões, sendo que o tempo demandado para os desenvolvimentos tecnológicos é somente uma particularidade passível de impactar na comercialização dos produtos desenvolvidos nesta área, considerada complexa por natureza (DE VRIES, 2006). Como consequência da complexidade intrínseca deste campo de estudo, os projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) devem lidar com os desafios gerados por ela, tais como o grande número de variáveis que influenciam os fenômenos em escala nanométrica (DI SAI, 2020), dificuldades e incertezas atreladas a viabilidade do *scale-up* (BELCHER et al., 2013; TSUZUKI, 2016), posição a montante em uma cadeia de valor complexa (BOREN; CHAN; MUSSO, 2012; MAINE; SEEGOPPAUL, 2016), entre outros.

Diante disso, o sucesso de projetos de pesquisa em áreas de ponta como a NT, depende da capacidade de gerenciar adequadamente as interações entre tecnologia, pessoas, organizações, *stakeholders* e interesses comerciais de maneira coesa e holística (FOSSUM et al., 2022). Para tal, é crítico que as instituições que interagem com os desenvolvimentos nanotecnológicos entendam como a NT difere das demais tecnologias, e quais são as implicações disto (SHEA, 2005).

Vários estudos abordam os desafios gerais relacionados à comercialização de produtos nanotecnológicos desenvolvidos durante anos de projetos de PD&I (AITHAL; AITHAL, 2016a, 2016b, 2016c; BELCHER et al., 2013; MAINE, 2013a, 2000; MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012; MAINE; SEEGOPPAUL, 2016; NASERI; DAVOODI, 2011;

REISS; HJELT; FERRARI, 2017; TSUZUKI, 2016). Ainda, há aqueles que enfatizam os desafios gerenciais na gestão de projetos de NT (FRANCO, 2023; MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012; ROSE; GAZSÓ, 2019; SHEA, 2005; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019). Estes estão em sua maior parte focados em projetos realizados em países desenvolvidos, sendo poucos os que estudam a realidade do desenvolvimento tecnológico em países em desenvolvimento (MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012; NASERI; DAVOODI, 2011; NGOC; HOANG; NOGALSKI, 2022).

Os projetos de PD&I em NT realizados em países em desenvolvimento, como o Brasil, são inerentemente influenciados por fatores derivados do ambiente em que estão imersos. Ou seja, fazer pesquisa de ponta e empreender na área de alta tecnologia em países em desenvolvimento não é o mesmo que realizá-la em países desenvolvidos (JESUS et al., 2017; MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012; NGOC; HOANG; NOGALSKI, 2022). Há diferenças significativas entre o Sistema Nacional de Inovação² (SNI) de países desenvolvidos e em desenvolvimento (SILVEIRA et al., 2016), que influenciam tanto a direção como a intensidade das atividades de inovação das organizações (TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, 2008).

Uma abordagem potencialmente complementar e enriquecedora na busca por uma compreensão aprofundada e análise crítica sobre projetos na área de NT, complexa por natureza (DE VRIES, 2006), e que advém da literatura de gestão de projetos é o estudo de Complexidade em Projetos (CP). A CP é definida como a “Presença de múltiplos elementos interconectados, incertezas, restrições e interdependências que tornam a prospecção, execução e gestão do projeto desafiadora e difícil de ser compreendida e gerenciada”. Ela é uma medida da interconexão, interdependência e variedade de elementos que compõem um projeto, bem como dos desafios e impactos que surgem dessas interações.

Estudos na área de gestão de projetos já reconhecem que projetos de NT se diferem de outros projetos em diversos aspectos, tais como intensidade de conhecimento,

² O SNI consiste em um grupo articulado de instituições dos setores público e privado (agências de fomento e financiamento, instituições financeiras, empresas públicas e privadas, instituições de ensino e pesquisa, entre outras) cujas atividades e interações geram, adotam, importam, modificam e difundem novas tecnologias (FREEMAN, 1995).

singularidade, complexidade na determinação dos objetivos finais e direções de desenvolvimento, heterogeneidade das etapas de implementação do projeto, entre outros (FRANCO, 2023; MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012; SHEA, 2005; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019).

Além disso, uma revisão de literatura recente sobre o tema evidenciou que o tópico gestão de projetos de NT é relevante e de interesse de estudiosos e cientistas (ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019). Isto pode ser visto, inclusive, a partir do surgimento de abordagens de gestão de projetos complexos adaptadas para esta realidade, como Franco (2023) e Jena e Das (2023).

Na área de CP as complexidades são vistas como uma variável-chave que impactam em muitas decisões (BAKHSI; IRELAND; GOROD, 2016; GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011), podendo afetar e/ou influenciar fortemente a gestão do projeto e seu sucesso (KAUFMANN; KOCK, 2022). Há mais de 20 anos foi identificada a necessidade de definir uma estratégia para melhorar a compreensão sobre a origem da complexidade nos projetos para auxiliar na gestão destes desenvolvimentos (WILLIAMS; HILLSON, 2002). Contudo, estudos recentes sinalizam que desafios associados a projetos de pesquisa complexos ainda têm recebido atenção limitada por parte da literatura (DE REZENDE; BLACKWELL; GONÇALVES, 2018; FOSSUM et al., 2022; FRANCO, 2023; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019).

Neste sentido, o estudo da complexidade em projetos de NT pode ajudar a robustecer o conhecimento sobre as características próprias destes desenvolvimentos, de forma a elucidar quais são as fontes de complexidades mais influentes, que podem impactar negativamente seu andamento e que potencialmente contribuem para que as expectativas de comercialização de produtos nanotecnológicos não sejam alcançadas.

O mapeamento destas complexidades e posterior análise pode contribuir para que, por exemplo, sejam estudadas e definidas quais são as complexidades esperadas para um determinado tipo de projeto a ser financiado por um órgão de fomento ou empresa. Diante deste diagnóstico, espera-se que os recursos possam ser alocados mais efetivamente à luz das complexidades previamente reconhecidas. Além disso, as estratégias de acompanhamento do financiador, bem como as de gestão da

coordenação do projeto poderão ser moldadas para lidarem com esta complexidade da melhor forma possível.

Ainda, de forma mais macro, o estudo da complexidade nos projetos de NT tem potencial para auxiliar no direcionamento dos esforços governamentais e das organizações durante a tomada de decisões que envolvam a alocação de recursos em projetos de PD&I — estratégia amplamente utilizada para estimular o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos em áreas emergentes da ciência — e, como consequência, contribuir para moldar a inovação nessa área (FOLEY; WIEK, 2013). Esse esforço pode, inclusive, promover uma análise mais aprofundada dos investimentos, uma vez que a alocação de recursos públicos na área de NT tem sido cada vez mais avaliada com base no avanço alcançado na comercialização de nanoproductos (SHAPIRA; YOUTIE, 2011).

Por fim, vale ressaltar que o campo de pesquisa da CP evoluiu de diferentes trabalhos seminiais desconectados para uma discussão mais ampla e centralizada, focada em caracterizar e classificar projetos complexos para identificação de modelos e estruturas que possam auxiliar na gestão de projetos complexos (FRANCO, 2023).

Estudos recentes reconhecem que esta área ainda possui diversos pontos de vista a se considerar, com diferentes visões sobre qual é de fato o conceito de complexidade que deve ser adotado (MIKKELSEN, 2020). Sendo que, segundo Mikkelsen (2020), grande parte destas visões são convergentes sob o seguinte aspecto: “There is no commonly accepted definition” (CHAPMAN, 2016).

Dentre os objetos de pesquisa promissores para a geração de contribuições na área de CP estão a análise de como as dimensões de complexidade podem ser utilizadas para analisar um projeto (DE REZENDE; BLACKWELL; PESSANHA GONÇALVES, 2018), e a realização de estudos que analisam a complexidade durante a execução dos projetos, ao invés de abordagens retrospectivas (KIM; WILEMON, 2003).

No entanto, mesmo diante de uma ampla literatura sobre complexidade (BACCARINI, 1996a; BENSLEY; SMITH; BARBER, 2021; BOSCH-REKVELDT et al., 2011; DE REZENDE; BLACKWELL; GONÇALVES, 2018; GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011; ICCPM, 2022; ROLSTADÅS; SCHIEFLOE, 2017) e, mais especificamente a CP e seu gerenciamento (FRANCO, 2023; PMI, 2014; REMINGTON; POLLACK, 2010; SAN CRISTÓBAL et al., 2018; TATIKONDA; ROSENTHAL, 2000; VERGA MATOS et

al., 2019; VIDAL; MARLE, 2008; WIELD; ROY, 1995), percebem-se oportunidades de investigação focadas na interface que estes estudos possuem com especificidades dos projetos de PD&I desenvolvidos em uma área de alta complexidade como a NT.

Neste sentido, com base nas pesquisas realizadas na base de dados Web of Science, Scopus e Google Acadêmico utilizando a combinação das seguintes palavras-chave tanto no título quanto no abstract dos artigos “*nanotechnology*”, “*nano-technology*”, “*nano tecnologia*”, “*nanomaterials*”, “*complexity*”, “*project complexity*”, “*project management*”, “*management*”, “*nanomateriales*”, “*complejidad*”, “*gestión de proyectos complejos*”, “*complejidad en proyectos*”, “*nanotecnología*” “*complexidade*”, “*gestão de projetos*”, “*nanotecnologia*”, “*nanomateriais*”, combinadas de diversas formas com os operadores booleanos NOT/NO, AND/E, OR/OU, não retornaram estudos específicos sobre como as fontes de complexidade próprias dos desenvolvimentos nanotecnológicos se manifestam no dia a dia da execução dos projetos PD&I em NT. Contudo, as literaturas na área de NT e gestão de projetos de NT evidenciam características destes desenvolvimentos que convergem com aspectos que remetem à presença de complexidades nestes projetos, portanto corroboram com o potencial de contribuição entre estes campos de estudo.

Adicionalmente, foi identificado somente um trabalho que tangencia a temática de complexidade em projeto de PD&I em NT desenvolvido no contexto brasileiro — Franco (2023) realizado com base na análise de um único projeto —, o qual certamente possui singularidades em relação aos estudos publicados nos demais países que contribuem para o desenvolvimento deste campo de pesquisa. Portanto, vê-se o aprofundamento teórico no campo da CP, com foco no estudo de diversos projetos de PD&I em NT executados no contexto brasileiro, como uma oportunidade de pesquisa que contribuirá para o desenvolvimento desta área.

Diante desse cenário, o presente estudo parte da literatura de NT e gerenciamento de projetos complexos e incorpora dados reais de projetos de NT para responder à questão central: como caracterizar a complexidade em projetos de PD&I na área de NT? Desta questão direcionadora do estudo desdobra-se seu objetivo principal: caracterizar a complexidade em projetos de PD&I na área de NT com foco em ciência dos materiais.

Para o desenvolvimento deste estudo será utilizada a estratégia metodológica de *flexible pattern matching*, que contrapõe complexidades potenciais previamente identificadas na literatura de NT e CP com dados reais obtidos a partir da análise de projetos do Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da Universidade Federal de Minas Gerais (CTNano/UFMG), para a construção de um *template* com os elementos de complexidade mais significativos em projetos nesta área. O CTNano/UFMG é um Centro de Tecnologia de uma Instituição de Ciência e Tecnologia (ICT), a UFMG, voltado ao desenvolvimento de pesquisa aplicada e focada na ampliação da competitividade de empresas brasileiras a partir da execução de projetos de PD&I em parceria com a iniciativa privada (CTNano/UFMG, 2023).

Este *template* tem como objetivo contribuir com o desenvolvimento e/ou aprimoramento de tecnologias gerenciais de apoio que sejam adequadas a essa realidade. Visto que a utilização de tecnologias gerenciais em áreas de fronteira pode gerar diversos benefícios para o desenvolvimento e impulsionamento de tecnologias passíveis de serem desenvolvidas nestes ramos.

Ante ao exposto, são objetivos específicos desta tese: (i) caracterizar os desenvolvimentos em NT e formas correntes de avaliação de projetos nessa área; (ii) codificar elementos de complexidades nas literaturas de gestão da CP e desenvolvimento de produtos nanotecnológicos e agrupá-los em macro dimensões; (iii) busca e identificação de um ambiente para a pesquisa de campo, no qual fosse possível obter informações em profundidade sobre os desafios enfrentados nos projetos de PD&I em NT (o ambiente escolhido para a pesquisa de campo foi o CTNano/UFMG); (iv) avaliar e validar com lideranças de 14 projetos de PD&I na área de NT, financiados por empresas de diversos setores industriais, quais elementos de complexidade são mais convencionalmente presenciados por eles neste tipo de projeto; (v) construir um *template* dos elementos de complexidade mais significativos presentes em projetos de PD&I na área de NT em ciências dos materiais.

Com base no alcance dos objetivos supracitados, espera-se que o presente estudo contribua para o aumento da compreensão sobre as características e complexidades dos desenvolvimentos tecnológicos em NT na área de ciência dos materiais. Com isto, almeja-se robustecer a análise crítica de diversos atores do ecossistema de inovação sobre estes desenvolvimentos. Isto pode, potencialmente, ter diversas implicações

como, por exemplo, o diagnóstico e identificação de oportunidades de melhorias na análise e avaliação de projetos desta natureza, bem como no melhor acompanhamento e monitoramento de sua evolução rumo à comercialização de produtos nanotecnológicos no mercado.

Julga-se tal forma de contribuição como potencialmente relevante diante: (i) do grande volume de investimentos realizados mundialmente em NT (CAO; APPELBAUM; PARKER, 2013; MIX, 2017; NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE, 2019; O'DONOGHUE, 2015; ROCO, 2005; WANG; JACOB; LI, 2019); (ii) do enorme potencial da NT para a geração de inovações aplicadas aos mais diversos segmentos industriais (BRASIL, MCTIC, 2019); (iii) do potencial revolucionário que esta área tem para o setor industrial, ainda não amplamente explorado (DOWLING et al., 2004); (iv) da necessidade de obtenção de uma maior sinergia entre os setores de P&D e os de produção e comercialização (ALVES; GALEMBEC; RIPEL, 2015); (v) do diagnóstico de que o ritmo do progresso real da NT em relação às previsões para a comercialização de produtos nanotecnológicos encontra-se defasado (AITHAL; AITHAL, 2015; BAINBRIDGE; ROCO, 2016; KOSHOVETS; GANICHEV, 2016, 2017); (vi) da necessidade de avançar em diagnósticos e *roadmaps* para o fomento de cadeias nacionais sustentáveis em termos de competitividade nesta área (BELLUCCI; VASQUEZ; CONTI, 2021); dentre diversos outros aspectos.

2 NANOTECNOLOGIA E AVALIAÇÃO DE PROJETOS

2.1 O que é nanotecnologia

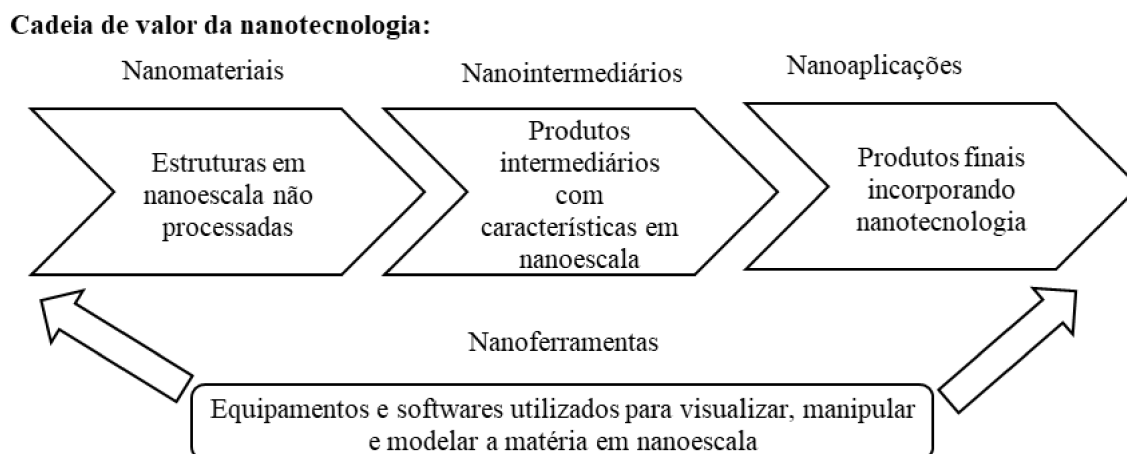
A Nanotecnologia (NT) é reconhecida como uma categoria especial de inovações tecnológicas que envolvem a manipulação da matéria em dimensões entre 1 e 100 nanômetros (SHEA; GRINDE; ELMSLIE, 2011), onde fenômenos únicos permitem novas aplicações (NSTC, 2007). A literatura científica postula que a NT deve ser considerada como Tecnologia de Propósito Geral (TPG), devido ao seu grande potencial de difusão, de dinamismo tecnológico e de indução de inovações onde for aplicada (KREUCHAUFF; TEICHERT, 2014). Mesmo que ainda emergente (ALVIAL-PALAVICINO; KONRAD, 2019; MOGOUTOV; KAHANE, 2007; SOLOMON, 2018), a NT é vista como uma das tecnologias mais promissoras do século XXI (PETERSON et al., 2020), por prometer melhorias significativas no ramo de materiais avançados e técnicas manufatura, que são fundamentais para a competitividade dos mais diversos segmentos industriais (MIYAZAKI; ISLAM, 2007).

Segundo a Lux Research (2004), a cadeia de valor da NT é composta por: nanomateriais, nanointermediários, nanoprodutos e nanoferramentas, conforme indicado na Figura 1. Os nanomateriais são matérias-primas que possuem propriedades únicas dependentes do tamanho, decorrentes de suas dimensões em escala nanométrica (ex. nanotubos de carbono, grafeno, fulerenos, dentre outros). Esses nanomateriais são incorporados aos nanointermediários (ex: recobrimentos, compósitos, resinas, dentre outros) adquirindo valor agregado e, posteriormente, aplicados em produtos (membranas, sensores, filamentos, dentre outros) que serão disponibilizados ao mercado (WANG; GUAN, 2012). Todas essas etapas são suportadas pelas nanoferramentas (raman, termogravimetria, microscópio eletrônico de varredura, transmissão, analisador de partículas, dentre outros), utilizadas para visualizar, manipular e modelar a matéria (LUX RESEARCH, 2004).

O principal objetivo de uma cadeia de valor, consiste em entender exatamente onde o valor é gerado (CHAIN, 2015). No caso da NT, por ser uma área emergente (MOGOUTOV; KAHANE, 2007), com muitos desenvolvimentos ainda em estágio laboratorial, esta cadeia é vista como incompleta (CHAIN, 2015). Como consequência, ainda pouco se sabe como as empresas irão gerar valor neste ramo e como as

tecnologias podem ser comercializadas com sucesso (MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012).

Figura 1: Cadeia de Valor da Nanotecnologia



Fonte: Traduzido e adaptado de Lux Research (2004)

2.2 Investimentos, mercado e comercialização da NT

Por ser considerada como uma área tecnológica estratégica, a NT tem atraído forte interesse dos governos, do setor privado e da academia (BELLUCCI; VASQUEZ; CONTI, 2021; MCTIC, 2020). A partir de 1990 foi percebido um aumento considerável nos investimentos em pesquisas nesta área (MIX, 2017; O'DONOGHUE, 2015), e desde 2000 mais de 60 países lançaram estratégias de desenvolvimento contemplando esta área em sua agenda nacional para o desenvolvimento de ciência e tecnologia (ROCO, 2005).

Tal como as demais TPGs, a área da NT é intensiva em conhecimento, está associada com um alto nível de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e, para tal, depende de profissionais altamente qualificados (EUROPEAN COMMISSION, 2021). A base de conceito das TPGs também foi considerada no Brasil a fim de estabelecer prioridades no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). De acordo com a portaria Nº 1.112 do MCTIC, de 19 de março de 2020, a NT foi definida como uma das cinco tecnologias habilitadoras consideradas como prioritárias para o período de 2020 a 2023.

Os investimentos públicos e privados internacionais em NT são muito expressivos, com políticas industriais e de ciência e tecnologia bem definidas em diversos países. Os Estados Unidos são o maior país investidor na área, com mobilização de uma alta quantidade de recursos por meio da National Nanotechnology Initiative (NNI). O orçamento proposto pelo governo para a NNI é de aproximadamente US\$ 1,7 bilhão em 2021 destinados ao P&D em NT (NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE, 2021). A ordem de investimentos é próxima aos anos anteriores, que se manteve superior a US\$ 1 bilhão ao longo dos últimos 15 anos.

Na União Europeia, a NT foi incluída no Horizon 2020, maior programa de PD&I realizado na região, com orçamento próximo a € 80 bilhões entre 2014 e 2020. Além disso, a Comissão Europeia criou em 2013 o programa *Graphene Flagship*, especificamente voltado para a área de grafeno, com orçamento de € 1 bilhão para 10 anos. O *Graphene Flagship* engloba uma quantidade superior a 150 grupos acadêmicos e industriais distribuídos em mais de 20 países.

A China também vem adotando uma estratégia ambiciosa de desenvolvimento nessa área (CAO; APPELBAUM; PARKER, 2013; WANG; JACOB; LI, 2019), ocupando o primeiro lugar mundial em número de artigos científicos e patentes (QIU et al., 2016). Este país começou a pesquisa em NT em meados da década de 1980, e agora tem visto algumas aplicações industriais bem sucedidas, com base em colaborações frequentes entre institutos de pesquisa, universidades e indústrias (OECD, 2017).

No Brasil existem iniciativas para o apoio e desenvolvimento da NT por parte do setor público (BELLUCCI; VASQUEZ; CONTI, 2021) e privado. Na esfera pública, pode-se destacar a criação do Programa de Desenvolvimento da Nanociência e da Nanotecnologia, em 2003, complementado pelo Plano Nacional de Nanotecnologia, em 2005, e posteriormente a Iniciativa Brasileira de Nanotecnologia (IBN), lançada em 2013 e institucionalizada em 2019. De acordo com o MCTIC, foram investidos cerca de R\$ 600 milhões de recursos públicos em NT nos últimos 16 anos (BRASIL, MCTIC, 2019). Os recursos foram aplicados em chamadas públicas, investimentos em laboratórios e projetos, apoio a projetos de cooperação internacional e eventos para a disseminação de conhecimento.

Um dos principais eixos estruturantes da IBN é o Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias (SisNANO), instituído pelo MCTIC em 2012 (BRASIL, MCTIC, 2012). O MCTIC também criou duas redes SibratecNANO (Rede de Centro de Inovação em Nanomateriais e Nanocompósitos; Rede de Centro de Inovação em Nanodispositivos e Nanosensores), com objetivo de apoiar a projetos cooperativos entre laboratórios integrantes do SisNANO e empresas interessadas na incorporação da nanotecnologia em seus produtos e processos. Além disso, o programa de INCTs do CNPq/MCTIC resultou na formação de mais de 16 institutos com trabalhos em NT. De acordo com os dados do MCTIC, estas ações resultaram no beneficiamento de mais de 50 Universidades/ICTs 200 grupos de pesquisa, 46 Redes de pesquisa, 26 Laboratórios Multiusuários do SisNANO, 16 INCTs, 600 projetos, além do apoio a diversos pesquisadores (BRASIL; MCTIC, 2019).

Outra iniciativa recente foi a formação da Rede MCTIC/EMBRAPII de Inovação em Grafeno, que selecionou 14 Unidades EMBRAPII da sua rede credenciada para promover a interação com o desenvolvimento industrial baseado em grafeno. Além destes, há também iniciativas nacionais de centros de tecnologia e/ou plantas piloto de produção de grafeno e nanomateriais de carbono, tais como CTNano/UFGM, MG Grafeno, MackGraphe e UCS GRAPHENE. Por ser intensiva em conhecimento, a área de NT também envolve a atuação intensa de diversos grupos de pesquisa em todo o Brasil. De acordo com a busca realizada no DGP do CNPq, em janeiro de 2021, foram identificados 1.322 grupos de pesquisa com linhas de pesquisa contendo a palavra “nano”, em comparação a 867 grupos em 2016 e 279 grupos em 2010.

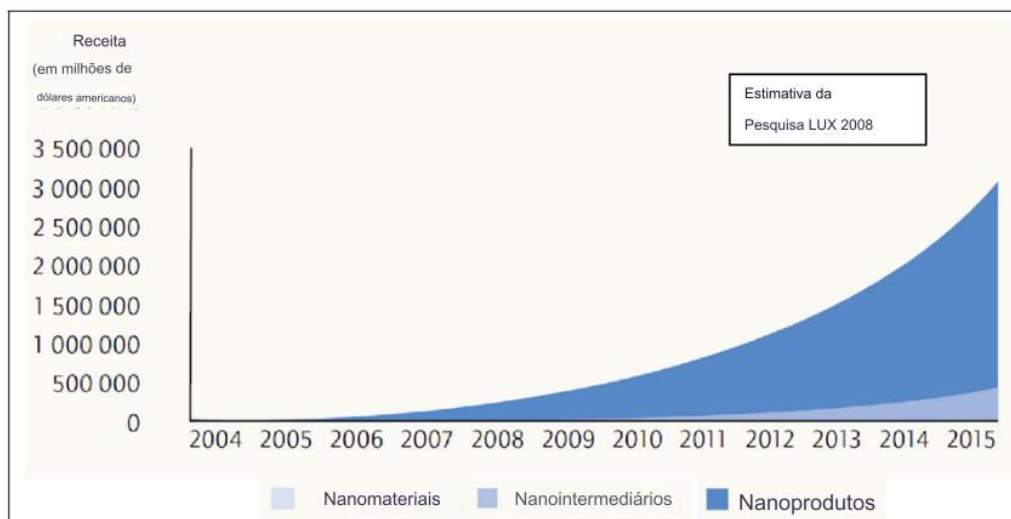
Ainda a nível nacional, existem empresas privadas que foram criadas para exploração comercial de NTs. De acordo com a PINTEC, 1.110 empresas de um total de 116.962 avaliadas no triênio 2015-2017 realizaram atividades em NT, sendo 418 usuários finais, 287 usuários integrados, 214 produtores e 151 em P&D (IBGE, 2020). De acordo com a base de dados StatNano, há a nível mundial a estimativa de cerca de 9 mil produtos de base nanotecnológica atualmente no mercado, comercializados por 2.803 empresas e presentes em 64 países (STATNANO, 2021).

Contudo, mesmo com seu grande potencial de transformação, segundo Piscopo et al. (2013) o setor de NT no Brasil ainda se encontra bastante incipiente, necessitando de suporte nas esferas pública e privada não somente para o desenvolvimento

tecnológico, mas também para a comercialização dos produtos e serviços resultantes de sua aplicação. Um estudo recente que corrobora tal visão é o panorama tecnológico do nanomaterial grafeno (BELLUCCI; VASQUEZ; CONTI, 2021), amplamente discutido a nível nacional e alvo de grande investimento por parte da iniciativa pública brasileira.

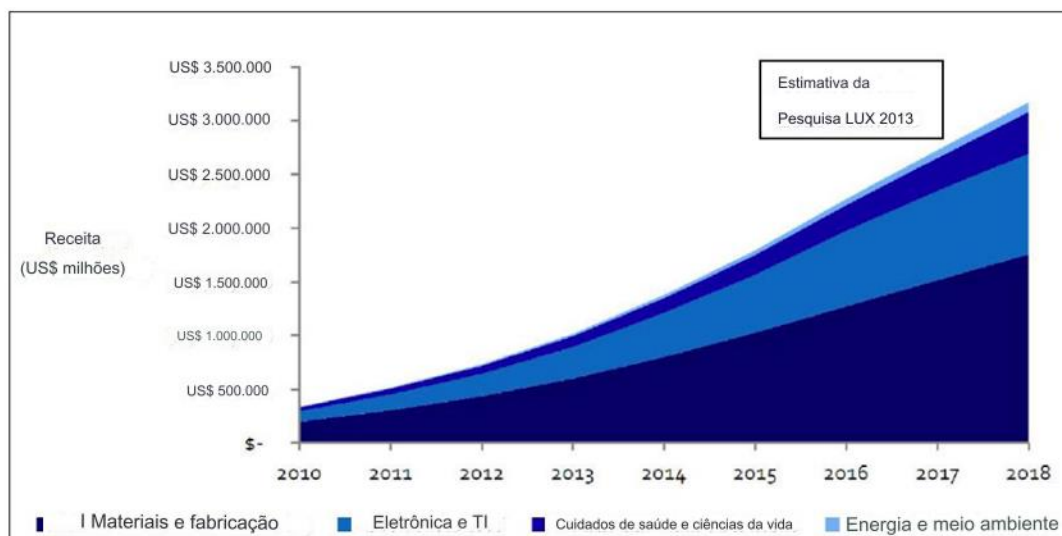
No que tange aos dados de mercado, Koshovets e Ganichev (2016, 2017) compararam projeções de receita dos produtos nanotecnológicos apresentadas pela LUX Research, empresa de pesquisa com maior autoridade na área. Koshovets e Ganichev (2016) evidenciam que em 2008 era previsto pela LUX Research que o volume total do mercado de produtos nanotecnológicos ultrapassasse 3 bilhões de dólares em 2015. No entanto, tal projeção foi atualizada em 2013 pela mesma empresa, indicando que este valor não seria alcançado antes de 2018 (KOSHOVETS; GANICHEV, 2016).

Figura 2 - Receita prevista para o mercado de produtos nanotecnológicos



Fonte: Traduzido de Koshovets e Ganichev (2016)

Figura 3: Atualização da previsão de receita para o mercado de produtos nanotecnológicos



Fonte: Traduzido de Koshovets e Ganichev (2016)

Dados apresentados por autores como Maine (2013b) e Koshovets e Ganichev (2016) corroboram com tal visão mais pessimista sobre o potencial de mercado da NT. Estes autores fazem uma análise de informações disponíveis no Lux Nanotech Index, um dos índices mais representativos na área, que visa acompanhar o desempenho de empresas que desenvolvem produtos nanotecnológicos. Maine (2013b) e Koshovets e Ganichev (2016) evidenciaram diversos exemplos que investimentos privados em NT não foram majoritariamente rentáveis na última década. Koshovets e Ganichev (2016) estudaram algumas empresas presentes no “ETF Lux Nanotech” que apresentaram retorno financeiro significativo nos últimos 10 anos, e perceberam que tal crescimento não pode ser atribuído à utilização da NT (diversas empresas que sobreviveram colocaram no passado a palavra “nano” nos seus negócios, mas agora se situam apenas como empresas de materiais).

Maine (2013b) sinaliza que a comercialização de produtos nanotecnológicos está incrivelmente lenta, o que está em sinergia as frustrações de projeções e expectativas levantadas neste campo (AITHAL; AITHAL, 2015, 2016a, 2016b; KOSHOVETS; GANICHEV, 2016; RENN; ROCO, 2006). Aithal e Aithal (2016a) compararam projeções com base no montante de investimentos aportados para viabilizar o desenvolvimento e inserção de produtos nanotecnológicos no mercado. Uma delas é a de Renn e Rocco (2006) que previam a terceira geração de NTs, integração entre nanosistemas para 2010-2015. Tal previsão foi atualizada por Aithal e Aithal (2015) para 2020-2035, Quadro 1.

Quadro 1: Projeções sobre a inserção de produtos nanotecnológicos no mercado

Geração Nanotecnológica	Desenvolvimento	Exemplos	Primeira previsão de Roco 2004 [3]	Previsão recente de Aithal 2015 [1]
Primeira geração	Nanoestruturas Passivas Ex : metais Revestimentos, nanoestruturados, polímeros, cerâmicas.	Nanomateriais, incluindo nanotubos e nanocamadas.	2000 - 2005	2000 - 2015
Segunda geração	Nanoestruturas Ativas Ex: transistores 3D, amplificadores, medicamentos direcionados, atuadores, estruturas adaptativas.	Mude seu estado durante o uso, respondendo de maneira previsível ao ambiente.	2005-2010	2015-2020
Terceira geração	Nanossistemas Ex: Montagem guiada; Redes 3D e novas arquiteturas hierárquicas, robótica.	Conjuntos de nanoferramentas trabalham juntos para atingir um objetivo final.	2010-2015	2020-2035
Quarta Geração	Nanossistemas Moleculares Ex: Dispositivos moleculares 'por design', design atômico, terapia genética.	Envolve o design inteligente de dispositivos moleculares e atômicos, levando a "compreensão e controle sem precedentes sobre os blocos básicos de construção de todas as coisas naturais e feitas pelo homem.	2015-2020	2035 - 2050
Quinta Geração	Singularidade	A taxa de crescimento nas aplicações NT torna-se infinita.	2020 - 2015	Além de 2050

Fonte: Traduzido de Aithal e Aithal (2016a)

Os dados supracitados evidenciam o interesse público e privado na área de NT, tanto no Brasil quanto no exterior. Este interesse resultou em um rápido aumento na atividade de patenteamento em NT nas últimas duas décadas e investimentos substanciais do governo, empresas e capital de risco (MAINE, 2013b). Contudo, já é constatado há algum tempo que o aumento dos investimentos em P&D em NT refletiu principalmente no crescimento das publicações científicas, ao invés do desenvolvimento e comercialização de novos produtos (INOVAÇÃO, 2005). Tal situação ainda é reconhecida por estudos mais recentes, que reconhecem que os esforços nas atividades de pesquisa superam substancialmente os esforços voltados à comercialização dos nanoproductos (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

Isto pode ser potencialmente explicado, por exemplo, pela grande lacuna existente entre o patenteamento universitário e as demandas do mercado, levando a uma baixa taxa de transferência de tecnologia e comercialização das soluções (WANG; GUAN, 2012). O que reforça o argumento de que a eficiência da transferência de invenções nanotecnológicas do laboratório para inovações na indústria depende da eficácia do processo de transferência de tecnologia, que é complexo (RAMBARAN; SCHIRHAGL,

2022). Ou seja, o número de pedidos de patente em um campo específico representa o nível das atividades tecnológicas correspondentes e não o volume de negócios realizados (SCHMOCH, 2007).

Isto chama atenção para que haja uma melhor compreensão tanto das razões pelas quais a comercialização da NT é limitada (MAINE, 2013b), quanto dos desafios enfrentados na interface na qual se concentra a maior parte do conhecimento passível de ser utilizado para o desenvolvimento tecnológico, nas universidades, e onde se tem a demanda por soluções inovadoras, nas indústrias (MAIRA; ETXABE; SERENA, 2018). Com base neste entendimento, os laboratórios desta área poderão desenvolver uma estratégia de inovação sólida, que contemple planos voltados para a comercialização das tecnologias, passíveis de serem aplicados desde as fases iniciais de concepção (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

2.3 Peculiaridades dos desenvolvimentos na área de NT

Novos materiais com propriedades mecânicas, térmicas, químicas ou elétricas únicas, claramente superiores aos tradicionais ou com altos níveis de desempenho são frequentemente chamados de materiais avançados (DI SIA, 2020). De acordo com a Enciclopédia de Materiais Avançados:

“Those where first consideration is given to the systematic synthesis and control of the structure of the material in order to provide a precisely tailored set of properties for demanding applications (BEVER, 1994, p. 70).”

Desenvolvimentos de tecnologias e produtos que buscam a obtenção e aplicação destes materiais avançados estão sendo feitos a uma taxa crescente, dado seu potencial de geração de inovações tecnológicas que podem beneficiar amplamente a sociedade (KENNEDY et al., 2019). Neste contexto, está inserida a NT, tendo os nanomateriais e nanocompósitos como exemplos de materiais avançados com grande possibilidade de aplicações em diferentes áreas. Devido a tal relevância, é previsto que o avanço da NT irá mudar as características dos produtos e serviços em quase todas as áreas da sociedade (AITHAL; AITHAL, 2016a).

No entanto, o ritmo lento do progresso real da NT em relação ao previsto para a comercialização de produtos nanotecnológicos faz com que seja necessário re-

examiná-lo criticamente para que os esforços do governo e das organizações que lidam com a pesquisa em NT sejam maiores e mais efetivos nesta área (AITHAL; AITHAL, 2016a; CAO; APPELBAUM; PARKER, 2013; MAINE, 2013b; NASERI; DAVOODI, 2011). Isto é corroborado por estudos recentes, ao reconhecerem que os esforços nas atividades de pesquisa superam substancialmente os esforços voltados à comercialização dos nanoproductos (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022). Portanto, tal análise crítica poderá contribuir para o desenvolvimento de estratégias de inovação, que contemplem planos voltados para a comercialização das tecnologias, passíveis de serem aplicados desde as fases iniciais de sua concepção (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

O termo “comercialização” foi definido de acordo com Naseri e Davoodi (2011), como o processo de transformar novas tecnologias em produtos comerciais de sucesso. Já a “comercialização com sucesso” foi definida como levar produtos do laboratório para o mercado, e vendê-los com lucro (MAINE, 2013b). Diante disso, a “comercialização de produtos que envolvem NT” está definida nesta tese como o “processo de transformar novas tecnologias desenvolvidas em laboratório em produtos, e levá-los para o mercado comercializando-os lucrativamente”.

Como potenciais elementos influenciadores desta realidade, tem-se o fato de que os desafios envolvendo a comercialização destes produtos tem sido subestimados (BRAUNSCHWEIG, 2003; MAINE, 2013b; O’DONOGHUE, 2015), bem como as peculiaridades dos desenvolvimentos de materiais avançados e NTs (MAINE, 2013b). As últimas serão abordadas neste tópico que será dividido em tópicos menores de forma a destacar as características dos desenvolvimentos em NT. Ao final deste tópico é apresentado um quadro que sintetiza as características dos desenvolvimentos em NT identificadas.

- *Estrutura*

As características de função e desempenho de um produto nanotecnológico estão fortemente ligadas à estrutura e a estrutura está fortemente ligada ao processo de produção (LINTON; WALSH, 2008). Diante disso, uma mudança no processo de fabricação provavelmente resultará em uma mudança significativa no produto, o que

pode acontecer em qualquer etapa do ciclo de vida do produto (LINTON; WALSH, 2008).

- *Inovações baseadas em processos (process-based innovation)*

Os desenvolvimentos em NT podem ser classificados majoritariamente como “inovação em processo (*process-based innovation*)”, uma categoria de inovação menos compreendida do que a “inovação em produto (*product-based innovation*)” (MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012). Uma inovação de produto normalmente se refere a um produto montado, que pode ser vendido a um cliente quando fabricado. Por outro lado, uma inovação em processo envolve novos produtos ou o aprimoramento de atributos de custo/desempenho de produtos existentes, resultando em “produtos baseados em processo (*process-based products*)” – e.g. como materiais de engenharia, produtos químicos e nanotecnologias (MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012). Em outras palavras, inovações em nanotecnologia são geralmente baseadas em alterações em processos, o que significa que a funcionalidade comercial de um produto nanotecnológico é determinada por meio de seu processo de fabricação que viabiliza atributos diferenciados ao produto, sendo tais atributos enfatizados, ao invés do produto em si (LINTON; WALSH, 2008; MAINE, 2013b; MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012).

Como tais inovações possuem características distintas, as abordagens de gestão e estratégias de comercialização para inovações baseadas em processo também devem ser distintas das comumente conhecidas para inovações baseadas em produto (LINTON; WALSH, 2008; UTTERBACK, 1994). No entanto, a grande maioria dos modelos de inovação usados atualmente são baseados em produtos montados ou serviço (BAGNO; SALERNO; DA SILVA, 2017), portanto, não levam em consideração as diferenças intrínsecas presentes nas tecnologias de materiais e na natureza facilitadora das NTs (LINTON; WALSH, 2008).

Tal constatação é preocupante, diante da grande expectativa que se tem em relação ao potencial de transformação da NT, para a geração de riqueza e empregos. Pois, como estes desenvolvimentos conseguirão ser bem sucedidos se os atuais modelos de inovação utilizados pelos financiadores de tais desenvolvimentos (e.g. governos e empresas) não estão adequados à realidade da NT (LINTON; WALSH, 2008)?

- *Negócios baseados em ciência (science-based business)*

As particularidades da inovação nesta área emergente (MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012) implicam que os empreendimentos em NT, como “negócios baseados na ciência (*science-based business*)”, sejam muito diferentes dos empreendimentos de tecnologia mais amplamente estudados, como aqueles construídos para explorar desenvolvimentos tecnológicos em eletrônicos, computadores e *software* (BELCHER et al., 2013). De acordo com Pisano (2010) empresas que possuem negócios baseados em ciência são diferentes de outros tipos de empresas de tecnologias, devido ao nível de incerteza que elas enfrentam ao longo do grande período de tempo demandado até a comercialização do produto (CARTER et al., 2003). Embora todas as indústrias experimentem algum tempo atraso e incerteza na aceitação comercial de seus produtos, negócios baseados na ciência são extremos (MAINE, 2013b). Ainda de acordo com Maine (2013b), tal extremismo justifica-se pelo desenvolvimento tecnológico e metas mais ambiciosas, regulamentações de segurança incertas e/ou mais rigorosas e porque muitas vezes estas desenvolvem produtos menos compreendidos pelos potenciais consumidores.

- *Setor intensivo em ciência*

A ideia de que não apenas a organização, mas também os padrões de inovação variam sistematicamente dependendo das características da tecnologia e do setor, é algo amplamente aceito e difundido na literatura (PAVITT, 1984). Em sua taxonomia Pavitt (1984) descreve três padrões setoriais de inovações que seguem trajetórias distintas “*supplier dominated*”, “*production intensive*” e “*science based*”. Esta diferenciação ressalta e reforça que os setores intensivos em ciência apresentam características singulares que devem ser consideradas nos diversos estudos realizados a seu respeito.

- *Duração dos desenvolvimentos (time to market)*

Historicamente na indústria de materiais, as inovações são caracterizadas por longos períodos de gestação entre a invenção e a chegada da inovação ao mercado (MAINE, 2000). Segundo Maine (2016) inovações em materiais avançados, levam tipicamente entre 5 e 15 anos para gerar um produto comercial, e podem demorar ainda mais para penetrar em múltiplos mercados. Por outro lado, empresas de tecnologia

convencionais gastam cerca de 02 anos do momento em que tiveram a ideia inicial até ter sua primeira venda (CARTER et al., 2003). Diante disso, de acordo com Maine (2013b), métodos de financiamento tradicionais para empresas de tecnologia como o capital de risco, que opera buscando lucro entre 3-5 anos para saírem do negócio (LERNER; LEAMON; HARDYMON, 2011), tornam-se inviáveis.

- *Aumento de escala (scale-up)*

O surgimento de inovações na área de NT consiste em um investimento de alto risco (WIELD; ROY, 1995), devido à alta incerteza tecnológica e de mercado durante este longo período no qual são enfrentados diversos desafios (MAINE, 2013c). Um dos principais desafios enfrentados pelos pesquisadores nos desenvolvimentos em NT é conseguir traduzir o trabalho laboratorial em um processo de manufatura de larga escala, vulgo fazer o *scale-up*, que não é algo sempre factível e comercialmente viável (MAINE; PROBERT; ASHBY, 2005; MAINE; SEEGOPPAUL, 2016; TSUZUKI, 2016).

Os nanomateriais sejam eles particulados, membranas, compósitos ou combinações complexas, podem ser muito mais sensíveis que os materiais convencionais a variáveis térmicas, níveis de umidade, taxas de cisalhamento no processamento, pureza dos materiais precursores, dentre diversos outros aspectos. Lidar com tal complexidade de forma a obter um maior controle sob os fenômenos, caracterizados por um grande número de variáveis com alto nível de interação mútua não é algo fácil (DI SIA, 2020), pois os pesquisadores possuem conjunto aparentemente interminável de variáveis que devem ser controladas para obter o melhor desempenho (BELCHER et al., 2013). Isto implica em incertezas sobre a ampliação de uma invenção em escala de laboratório para um processo de fabricação seguro e comercialmente viável (MAINE, 2013b).

Tais complexidades atreladas à customização do desenvolvimento do produto para uma aplicação específica, podem demandar um grande volume de recursos, como milhões de dólares durante vários anos (MAINE; SEEGOPPAUL, 2016), o que contribui para que os investimentos nesta área sejam geralmente feito por grandes empresas e governos (FREEMAN, 1997). Diante disso, Belcher et al. (2013) sugerem que, no caso de NTs, ter uma tecnologia robusta e industrializável pode ser mais interessante do que procurar indefinidamente por uma otimização máxima do processo produtivo.

- *Gestão*

A realização de uma boa gestão dos desenvolvimentos em NT é vista como um dos principais desafios enfrentados por países em desenvolvimento nesta área (MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012; NASERI; DAVOODI, 2011). Segundo Naseri e Davoodi (2011), uma das formas de identificar que isto consiste em um ponto falho se dá ao observar a falta de interação entre diferentes organizações para a consolidação de uma cadeia de valor, bem como uma gestão interna inadequada em centros de desenvolvimento e parques tecnológicos. Essa deficiência em gestão pode contribuir para que as tecnologias se restrinjam ao ambiente laboratorial, seja por desconhecimento de como fazê-lo ou adoção de estratégias erradas (AITHAL; AITHAL, 2016a).

Diante disso, estudos com *start-ups* de NT sugerem que entre os fundadores da empresa haja algum com *background* em gestão, e reforçam a importância do suporte do conselho consultivo da *start-up* (e/ou mentores) para preencher lacunas e fornecer orientações sobre aspectos gerenciais (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

A importância dos aspectos gerenciais nos desenvolvimentos nanotecnológicos também é algo abordado em algumas literaturas na área de gestão de projetos. Estas reconhecem que projetos de NT se diferem de outros projetos em diversos aspectos e, como consequência, sinalizam que os mecanismos de gestão nesta área devem ser adaptados às especificidades desses projetos (FRANCO, 2023; MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012; SHEA, 2005; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019).

Por fim, vale ressaltar que os aspectos gerenciais nesta área estão também muito atrelados às questões de gestão de riscos em relação à Saúde, Meio ambiente e Segurança (SMS) na manipulação e utilização de nanomateriais (WANG et al., 2010; COLLYER et al., 2010; LENFLE, 2008; PROCCA, 2008; BARNES et al., 2006; KUHNEL et al., 2016; BROCKE et al., 2015; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019). Este recorte será abordado em um tópico à parte, devido a sua relevância para os desenvolvimentos em NT.

- *Vale da morte (Valley of death)*

De acordo com Belcher et al., (2013) a comercialização da NT é mais vulnerável ao “Vale da Morte” em comparação com outras tecnologias por razões relacionadas ao foco do produto, engajamento de mercado, expansão e desenvolvimento do produto. “Vale da Morte” é definido por Frank et al., (1996) como o *gap* que existe entre a pesquisa (com todas as suas incertezas) e desenvolvimento de produtos (com foco no retorno econômico). Isto gera uma lacuna nos Technology Readiness Levels (TRLs) intermediários, nos quais a academia não tem tanto interesse em atuar, mas o risco continua alto para as empresas, que preferem atuar nos TRLs finais (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

A causa do Vale da Morte é frequentemente associada à falta de recursos, contudo, de acordo com Belcher et al., (2013), no caso da NT o vale da morte consiste em apenas um sintoma gerado por outros problemas. Christensen et al., (2004) destacaram a complexidade de um produto e o alto preço para uma determinada aplicação de mercado como as razões para a incapacidade de uma tecnologia de sair do vale da morte com sucesso.

Belcher et al., (2013) alegam que, de um lado do vale da morte estão os fornecedores da tecnologia e, do outro os potenciais compradores (e.g. empresas com produtos existentes no mercado que possam se beneficiar da NT e instituições financeiras que desejam investir capital em desenvolvimentos nesta área para o desenvolvimento de novos produtos). Belcher et al., (2013) alega que é estratégico para as empresas que desenvolvem NTs a atração de ambos os parceiros, pois eles podem contribuir de forma convergente para que seja demonstrado o valor daquela tecnologia em uma aplicação, seja a partir do financiamento para a demonstração de protótipos mais robustos, direcionamento de mercados estratégicos, dentre outras formas (MCGAHN, 2005).

- *Pouco conhecimento dos potenciais clientes*

No caso da NT, por proporcionar melhorias em propriedades de um produto, os fornecedores costumam tentar vender o produto focando especificamente no aspecto tecnológico, ao invés de mostrar para os potenciais clientes o valor do produto como um todo de uma forma mais palatável. Isto é importante, inclusive, porque segundo os autores a maior parte das empresas que iriam se beneficiar com a NT possuem pouca

ou nenhuma experiência nesta área (BELCHER et al., 2013), o que dificulta a compreensão destes sobre as soluções nanotecnológicas (MAINE, 2013b).

- *Estratégias para comercialização das nanotecnologias*

As peculiaridades dos desenvolvimentos envolvendo NT também podem ser identificadas ao avaliarmos alguns fatores que a literatura considera como críticos para o sucesso da comercialização das NTs. O primeiro deles é a necessidade de foco no produto e na aplicação mais viável comercialmente e alcançável, ao invés de direcionar esforços para atribuir valor a plataforma tecnológica como um todo, devido a seu potencial de utilização em diversos mercados (BELCHER et al., 2013).

Devido ao seu caráter genérico, a NT pode ser aplicada a diversas indústrias (MAINE; GARNSEY, 2006). Scott Shane (2004) diz que tais tecnologias são mais atrativas para o aporte de investimentos devido a amplitude das oportunidades que podem advir destas. Contudo, Maine (2006) sinaliza que isso é parcialmente verdadeiro no caso das NTs. Porque é necessário contrabalancear o potencial de inovar em diversas indústrias com os investimentos em P&D necessários, até que seja comprovada a viabilidade de uma aplicação, sendo que a seleção de um mercado inicial se configura como um grande desafio.

Em sinergia com Belcher et al. (2013), McGahn (2005) alega que ir atrás de muitos mercados dilui os recursos e reduz a capacidade de execução, portanto, a chave para uma comercialização bem-sucedida está no foco. Tal direcionamento é muito importante diante do caráter genérico da NT, pois o desenvolvimento do material deve ser direcionado para cada mercado alvo, de forma a customizar diversos aspectos do processo para conferir os atributos de performance demandado (MAINE; SEEGOPPAUL, 2016). Além disso, a funcionalidade de cada diferente combinação de materiais e atributos deve ser comprovada em escala (MAINE; SEEGOPPAUL, 2016).

Ante ao exposto, vê-se que a própria amplitude da criação de valor que os materiais avançados fornecem, também pode aumentar a incerteza do mercado. Portanto, a escolha de um mercado inicial alvo – ou seja, correspondência tecnologia-mercado – deve ser muito mais prioritário nestes casos do que para empreendimentos de *software* que, embora também desenvolvam tecnologia genérica, podem pivotar

facilmente de forma muito mais rápida que os desenvolvimentos em NT (BOREN; CHAN; MUSSO, 2012; MAINE; GARNSEY, 2006; MAINE; SEEGOPPAUL, 2016).

Entretanto, Belcher et al. (2013) ressaltam que é importante mapear os potenciais mercados e aplicações, ao invés de ir diretamente para o mercado tido como “o mais óbvio” e o maior segmento de mercado (BELCHER et al., 2013). Sendo que, segundo Bennett (2008) a aplicação de técnicas tradicionais de pesquisa de mercado, como grupos focais, questionários, entrevistas e similares, são insuficientes e ineficazes para a comercialização da NT. Isto porque clientes ou usuários geralmente não sabem o que realmente querem até ver, especialmente, no caso de produtos muito inovadores. Somente quando eles podem obter maquetes ou ver, sentir e analisar um protótipo, eles podem fornecer *feedback* sobre seu valor e identificar potenciais geradores de valor até então ocultos. Ante ao exposto, nesta área os métodos carecem dos benefícios que podem surgir da avaliação de uma maquete ou protótipo, por exemplo (BELCHER et al., 2013).

Outro aspecto interessante a ser ressaltado, é o aconselhamento dos estudiosos desta área em relação a estratégia de comercialização a ser adotada. Eles sugerem que após ter estudado a fundo um grande mercado alvo, tê-lo segmentado e definido uma aplicação mais viável e mais comercialmente alcançável, as empresas de NT devem entrar a fundo nesta aplicação. Isso é denominado *beachhead application* (BELCHER et al., 2013).

Segundo Moore (1991) o conceito de “*beachhead application*” ou aplicação de “cabeça de praia” é aplicado quando as empresas de tecnologia escolhem inicialmente se concentrar em um único mercado – uma cabeça de praia – e dominar esse pequeno mercado específico antes de usá-lo como um trampolim para conquistar mercados adjacentes estendidos.

Uma das táticas utilizadas para “*beachhead application*”, é a identificação de uma melhoria incremental para um produto existente e, comunicar ao cliente os benefícios gerados, mas sem descrever a ciência por trás disso (BELCHER et al., 2013). Maine, Lubik e Garnsey (2012) demonstram que empreendimentos de NT de alto valor se concentram inicialmente em mercados de substituição, de menor risco, enquanto asseguram a propriedade intelectual para fornecer posteriormente um produto

disruptivo em mercados emergentes (MAINE, 2013b, 2013c). Sendo que a escolha destes mercados deve também levar em consideração a análise da menor presença de barreiras em relação a regulamentação, necessidade de inovações complementares e desafios enfrentados em inovações em processos (MAINE; GARNSEY, 2006).

Uma vez decidida a “*beachhead application*”, os recursos da empresa precisam ser implantados no desenvolvimento e comercialização de novos produtos para a demonstração clara de valor neste mercado (BELCHER et al., 2013; MCGAHN, 2005).

- *Propriedade intelectual*

O estabelecimento de uma propriedade intelectual em NT também tem suas particularidades. Ela pode ter sido desenvolvida com uma aplicação e mercado em mente, mas, por sua própria natureza, pode encontrar várias aplicações em vários setores. As aplicações e mercados almejados podem ser diversas e distintas, tornando a comercialização da propriedade intelectual da NT ainda mais desafiadora (BELCHER et al., 2013). Diante disso, Maine (2013b) recomenda que os cientistas-empresendedores procurem patentear suas invenções de forma ampla, incluindo aplicações em mercados emergentes, pois isso pode contribuir para superar desafios na comercialização futura dos nanoproductos.

A propriedade intelectual em NT geralmente é gerada através de acordos de parceria com empresas, ou através do estabelecimento de empresas *startups*, que também licenciam frequentemente a propriedade intelectual desenvolvida na Universidade (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022). O licenciamento desta propriedade intelectual envolve diversas atividades, que tornam o processo de transferência de tecnologia grande, multifacetado e complexo (RAMBARAN; SCHIRHAGL, 2022).

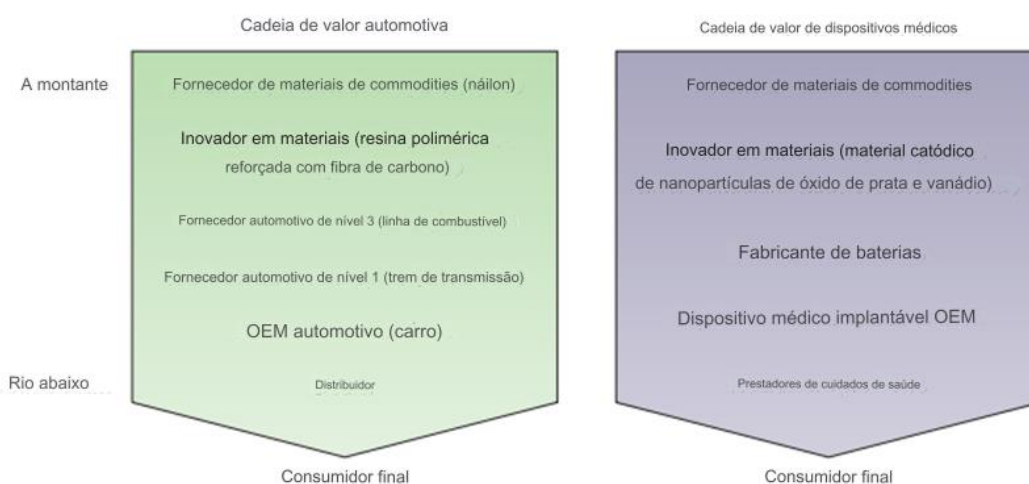
- *Posição a montante (upstream) na cadeia de valor*

De forma geral, aspectos desafiadores em relação ao acesso ao mercado são visivelmente presentes no caso da exploração comercial de materiais avançados (MAINE; SEEGOPPAUL, 2016). Segundo Maine (2016), os altos níveis de incerteza mercadológica estão vinculados à “*posição a montante (upstream)*” que as empresas de materiais avançados estão em relação às cadeias de valor das indústrias

almeçadas (Figura 4). A autora adota o conceito de “cadeia de valor” como o conjunto de atividades e empresas envolvidas na fabricação e distribuição de um produto (PORTER, 1985). E posição a montante na cadeia de valor significa basicamente que existem diversas empresas intermediárias entre a empresa de NT e o consumidor final (MAINE, 2013b).

A posição a montante na cadeia de valor das indústrias-alvo aumenta a incerteza mercadológica e dificulta a adoção da tecnologia pelo cliente final (MAINE; SEEGOPPAUL, 2016). Tal distanciamento é comum em *process-based innovation*, pois esse tipo de inovação está pelo menos um passo mais longe do cliente final, quando comparada a *product-based innovation* (MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012). No caso dos materiais avançados e NT, esse distanciamento faz com que o desenvolvimento de novos produtos fique mais complicado, pois dificulta o acesso das empresas de NT as necessidades dos clientes, dificulta o acesso a experimentação e *feedback* dos mesmos e reduz a velocidade de adoção do produto (MAINE, 2013b; MAINE; SEEGOPPAUL, 2016).

Figura 4: Posição das empresas de materiais avançados na cadeia de valor.



Posição na cadeia de valor. Nas cadeias de valor de muitas indústrias (aqui exemplificadas pelas indústrias automóvel e de dispositivos médicos), o inovador de materiais está a comercializar a sua tecnologia a partir de uma posição a montante (mais longe do consumidor final), o que aumenta a incerteza do mercado e complica a adoção da tecnologia. O fabricante do equipamento original (OEM) raramente é o iniciador da inovação dos materiais.

Fonte: Traduzido de Maine (2016)

- *Complexidade da cadeia de valor*

Outro aspecto importante relacionado a cadeia de valor consiste em sua complexidade. Boren (2012) fez um estudo do processo de comercialização de novos produtos e materiais envolvendo empresas químicas e de materiais. O autor enfatiza que obstáculos atrelados à cadeia de valor podem ter efeito expressivo no tempo de adoção de novos materiais. Pois cadeias de valor complexas podem inibir a adoção de novos materiais simplesmente porque elas requerem um alinhamento e realinhamento substancial para acomodá-los dentro desta cadeia. Ainda segundo o autor, características que evidenciam a complexidade de uma cadeia de valor podem ser vistas de diversas formas, dentre elas o número de passos dentro da cadeia, a distribuição geográfica dos atores e as estruturas contratuais que devem ser adotadas.

Tendo como referência os exemplos de Maine (2016), fica evidente que no desenvolvimento de materiais avançados o número de passos dentro da cadeia de valor é um desafio, além da possibilidade dos atores estarem distantes geograficamente e terem que adotar estruturas contratuais complexas para definir bem o escopo de atuação de cada um bem como as interfaces que devem ser estabelecidas. Ou seja, tal complexidade dificulta o reconhecimento do potencial que os materiais avançados tem a agregar para o cliente final, dificultando assim seu convencimento, mesmo que sejam feitos protótipos para elucidar tal agregação de valor (MAINE; SEEGOPAUL, 2016).

- *Necessidade de inovações complementares*

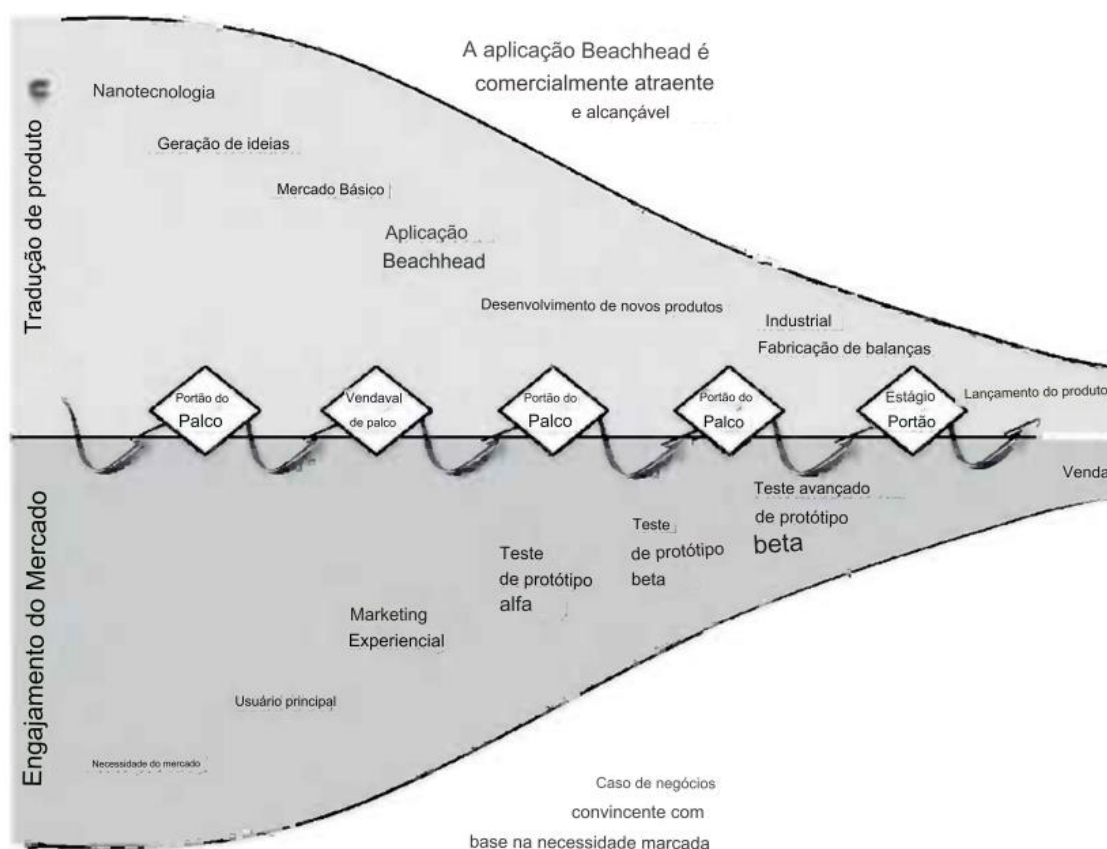
As inovações em materiais avançados não são autônomas: elas dependem de inovações complementares relacionadas a elas para serem trazidas ao mercado como um produto (MAINE; GARNSEY, 2006). “Inovações complementares” são definidas por Maine (2016) pelo conjunto de avanços relacionados necessários para tornar um produto viável. Segundo Maine e Garnsey (2006), existem inúmeros exemplos históricos da necessidade de inovações complementares em materiais avançados. Sendo que a necessidade dessas inovações complementares aumentam a incerteza do mercado de aplicações das NTs (MAINE; SEEGOPAUL, 2016). Uma das possíveis estratégias para lidar com a necessidade de inovações complementares em NT consiste no estabelecimento de alianças estratégicas com empresas que possuam

alguma influência sobre o desenvolvimento das inovações complementares necessárias (MAINE, 2013c).

- *Estratégias utilizadas para o desenvolvimento de produtos*

Existem na literatura vários métodos que visam o desenvolvimento de novos produtos, mas autores que lidam com desenvolvimento em NT sugerem o “*spiral product development*” (BELCHER et al., 2013; BENNETT, 2008), Figura 5. Este método proposto por Cooper (2008) consiste em uma adaptação do processo de P&D, com o objetivo de proporcionar iterações planejadas nas várias fases de desenvolvimento.

Figura 5: *Spiral product development*



Fonte: Traduzido de Belcher et. al (2013)

Essas iterações consistem em uma série de construções, testagem, coleta de *feedbacks* e revisão em cada etapa (BELCHER et al., 2013; COOPER, 2008). Mais especificamente, elas seguem os passos descritos a seguir (UNGER; EPPINGER, 2002): (i) Determinar objetivos, alternativas e restrições; (ii) Identificar e gerir riscos;

(iii) Avaliar alternativas; (iv) Desenvolver as entregas para essa iteração e verificar se estão corretas e (v) Planejar a próxima iteração (se houver).

Elas servem para superar as dificuldades em relação à clareza dos requisitos iniciais do produto na área de nanotecnologia, que constitui um desafio para o tradicional processo de *stage-gate* (BELCHER et al., 2013). Portanto, tal como a interação precoce e frequente entre marketing e P&D tem sido defendida há muito tempo para o desenvolvimento eficaz de produtos, para o desenvolvimento de novos produtos essa interação deve ser aplicada também a nível de tecnologia e incerteza do mercado (MAINE, 2013c). Dessa forma, espera-se que aspectos de mercado e de pesquisa e desenvolvimento não sejam conduzidos separadamente e de forma pontual, mas estejam reunidos e executados de forma altamente interativa ao longo de um intervalo de tempo (BELCHER et al., 2013).

Uma outra forma de proporcionar e/ou potencializar tal interação é a partir do co-desenvolvimento com empresas parceiras que possuam conhecimentos complementares sobre aspectos de mercado e/ou pesquisa (MAINE; GARNSEY, 2012). Um exemplo disso é a realização de alianças com grandes empresas que já possuem solidez em um mercado específico e que podem, a partir do seu *know-how* e experiência de mercado, facilitar o direcionamento e o desenvolvimento de produtos e protótipos pelas empresas de NT (MAINE, 2013b).

- *Indicadores de evolução do desenvolvimento tecnológico*

Belcher et al.,(2013) afirmam que no caso das nanotecnologias, outra peculiaridade consiste no fato de que a comercialização das nanotecnologias não possui indicadores irrefutáveis que evidenciem a remoção do risco de desenvolvimento do produto ou heurísticas para medir o aumento de valor quando algum risco é superado. Ou seja, nesta área não há uma maneira universalmente aceita de medir o valor absoluto do progresso da comercialização da NT (como *milestones* específicos para o desenvolvimento de seus produtos). Ainda, segundo os autores:

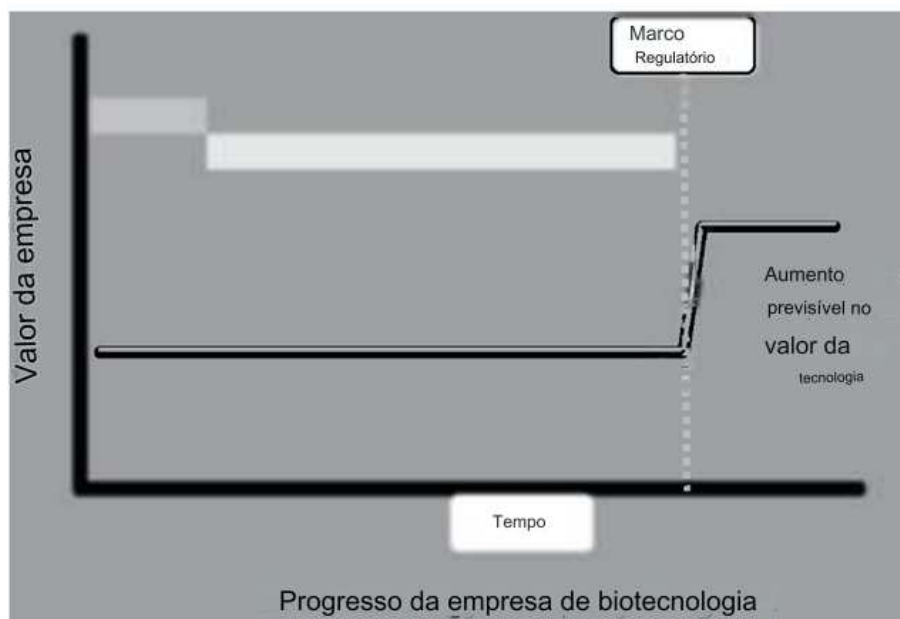
“This makes the process of predicting verifiable, unambiguously defined product development milestones, the time between those milestones and the increase in value of the nanotechnology venture upon achievement of a milestone extremely challenging (BELCHER et al., 2013, p. 193).”

O que é diferente de indústrias mais maduras, que possuem seus próprios indicadores e medidas para o desenvolvimento de produtos, como é o caso do TRL para a indústria aeroespacial. Da indústria de computação, que possui versões alfa, beta, *advanced beta* dos produtos. E até mesmo de uma indústria emergente, como é a biotecnologia, mas que possui, tal como a indústria farmacêutica, que passar pelos testes clínicos de Fase 1, Fase 2 e Fase 3 (BELCHER et al., 2013).

Como consequência, uma empresa de NT pode fazer o desenvolvimento de produtos utilizando o método de espiral e obter progressos ao longo do tempo, contudo não há nenhum sinal extrínseco que justifique um aumento proporcional no valor da empresa (BELCHER et al., 2013). Tal constatação pode ser vista nas Figura 6 e Figura 7 abaixo, que retratam (comparativamente às empresas de biotecnologia) que é discutível se o empreendimento de NT atingiu um aumento de valor (ou diminuição) ao final de um determinado período (BELCHER et al., 2013; MAINE, 2013c).

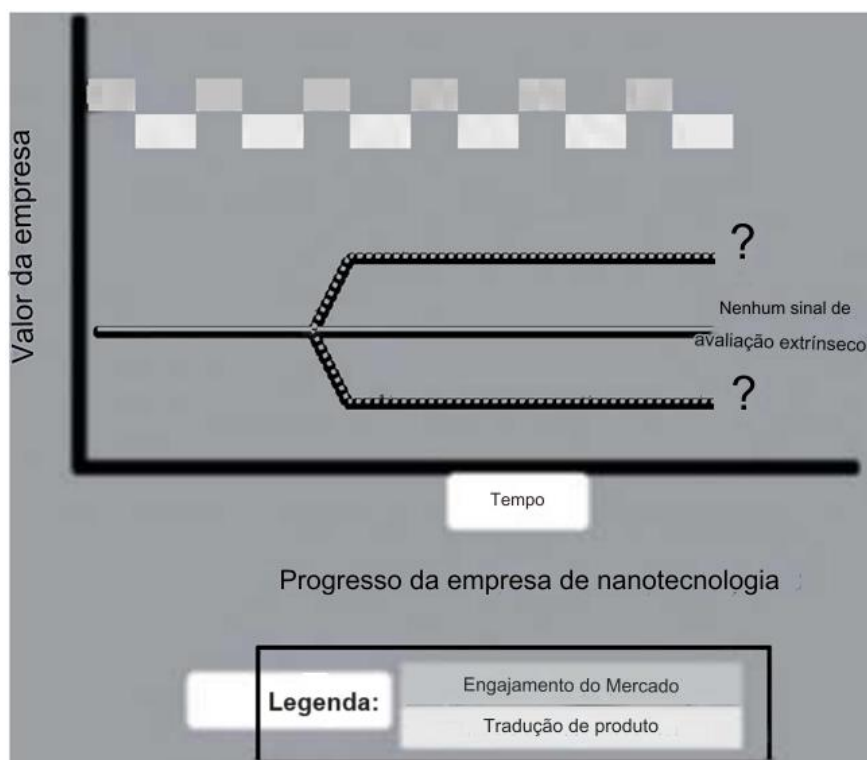
Ainda segundo Belcher et al., (2013) isso é uma causa raiz significativa para a falta de financiamento para os desenvolvimentos de NTs atravessarem o vale da morte, pois a efetivação do investimento demandará muito esforço e conhecimento da instituição financiadora ou empresa para comprovar que o desenvolvimento está no caminho certo. Portanto, cabe ainda mais à empresa de NT saber mostrar e comprovar o valor da solução que ela está oferecendo ao mercado. Sendo que uma das formas de se fazer isso é mostrar os resultados no engajamento contínuo do mercado, seleção de uma *beachhead application*, utilização do método espiral para desenvolvimento dos produtos e buscar a realização de uma fusão com alguma empresa que aplica/consome sua tecnologia.

Figura 6: Evolução do valor dos desenvolvimentos em biotecnologia ao longo do tempo



Fonte: Traduzido de Belcher et. al (2013)

Figura 7: Evolução do valor dos desenvolvimentos em nanotecnologia ao longo do tempo



Fonte: Traduzido de Belcher et. al (2013)

- *Realização de experimentos*

Em NT, não é possível realizar os “experimentos de alta fidelidade, baixo custo, desempenho rápido e altamente informativos” recomendados por Chesbrough (2010) para empresas de base tecnológica (MAINE, 2013c). Os desenvolvimentos em NT têm que abrir mão da fidelidade para ter um baixo custo em um prazo razoavelmente curto, ou deverão gastar grandes quantias de dinheiro por um longo período de tempo para alcançar alta fidelidade em suas experimentações (MAINE, 2013c).

- *Acesso a equipamentos de caracterização apropriados*

Para que as descobertas em NT vão rumo a aplicações maduras, são necessárias ferramentas de caracterização mais eficientes com vários recursos para garantir aos clientes qualidade, desempenho e segurança (RICHMAN; HUTCHISON, 2009). Tal importância pode também ser vista na Figura 1, Cadeia de Valor da Nanotecnologia, que coloca as “nanoferramentas” como presentes em todos os seus elos. Entretanto, o acesso aos equipamentos adequados para a caracterização desses nanomateriais pode ser restrito a um pequeno grupo devido ao seu alto custo, o que pode ser também outro entrave para a maturação das aplicações nanotecnológicas (BELCHER et al., 2013).

- *Saúde, Meio ambiente e Segurança (SMS)*

Os efeitos benéficos das novas tecnologias são frequentemente confrontados com preocupações relativas à segurança de novas substâncias ou materiais, o que não é diferente para o caso dos nanomateriais (KUHNEI et al., 2016). A NT é uma área emergente ainda com pouca regulamentação sobre aspectos de SMS e pouco conhecimento prático sobre o impacto da utilização dos nanomateriais em longo prazo. Entretanto, estudiosos reconhecem que o ciclo de vida das aplicações que contenham nanomateriais e o seu impacto no ambiente devem ser entendidos em profundidade (VIJAYAKUMAR et al., 2022).

Tal preocupação é válida pois a matéria em nanoescala pode se comportar de maneira diferente do mesmo material em uma forma maior, ou seja, o ponto de fusão, a cor, a resistência, a reatividade química de um material, entre outros aspectos, podem mudar em nanoescala (NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE, 2019). Além disso, propriedades físicas como tamanho de partículas, composição, área superficial, carga, química de superfície e estado de aglomeração influenciam a

biocompatibilidade dos nanomateriais, o que faz com que sejam necessárias vários testes e informações sobre sua interação com os organismos vivos para que sejam considerados seguros (YOSHIOKA; TSUTSUMI; KAZUMA, 2016). Este cenário mobiliza um grande esforço de órgãos reguladores, pesquisadores e agentes políticos para o estabelecimento de *frameworks* norteadores nesta área (MAINE, 2013a; KUHNEI et al., 2016).

Uma iniciativa que ilustra bem este esforço é o projeto NANoREG, liderado pela União Europeia no período entre 2013 e 2017. Essa iniciativa consistiu em um esforço mundial para dar suporte científico à estruturação do processo de regulação e regulamentação da NT e dos produtos desenvolvidos utilizando nanomateriais (JOINT RESEARCH CENTRE, 2017). Ela contou com a participação de 17 países, entre eles o Brasil, através da atuação de oito laboratórios brasileiros: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade de São Paulo, Universidade Federal do Rio Grande, UFMG e a Universidade Estadual de Campinas (MCTI, 2020). No cenário atual, extensas pesquisas e avaliações de campo e de laboratório estão caminhando rumo a um conjunto significativo de conhecimentos sobre o manuseio seguro de nanomateriais (AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2021).

- *Considerações parciais*

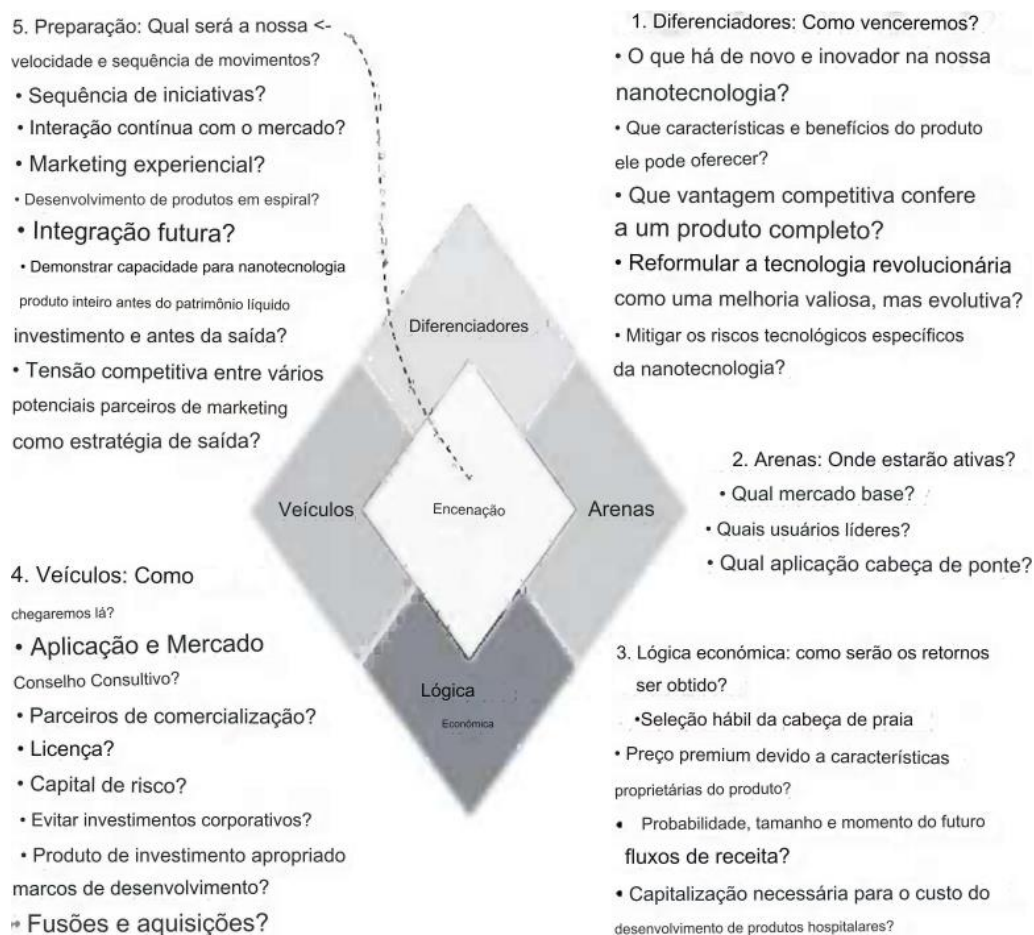
Tal como grandes expectativas em relação aos resultados esperados a partir da manipulação da matéria em escala nanométrica, os esforços empreendidos para alcançá-los também são elevados. A alta complexidade dos fenômenos envolvidos nos desenvolvimentos de materiais avançados demanda grandes esforços dos pesquisadores para gerenciá-la de forma adequada (DI SIA, 2020).

Com o objetivo de contribuir para a comercialização das NTs Belcher et al., (2013) propõem um *framework* que contempla fatores críticos para o sucesso desta comercialização, Figura 8. Segundo os autores, esse *framework* pode servir como uma lista de verificação à comercialização de NTs e como um meio para garantir que os elementos da estratégia de comercialização estejam alinhados entre si e se encaixem no macroambiente.

Ante ao exposto neste tópico, percebe-se que diversos estudos afirmam que o processo de combinação de tecnologia e mercado é particularmente desafiador para uma tecnologia radical, genérica, baseada em processos e comercializada a partir de posições a montante nas cadeias de valor da indústria, como é o caso dos materiais avançados e NT (MAINE; GARNSEY, 2007; MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012; MAINE, 2000, 2013c).

Este desafio é potencializado pela necessidade de um longo tempo de desenvolvimento para as NTs, marcado por grandes incertezas científicas, pela demora desde a escrita até a aprovação e licenciamento de patentes, pelos obstáculos e incertezas regulatórias e de segurança desde o desenvolvimento tecnológico até a comercialização dos produtos, pela necessidade de grande montante de capital, entre outros aspectos (KAUR et al., 2014; MAINE, 2013b).

Figura 8: Fatores críticos para o sucesso da comercialização de NTs



Fonte: Traduzido de Belcher et al. (2013)

Com o objetivo de sintetizar as características dos desenvolvimentos na área de NT abordadas nesta seção, o Quadro 2 traz um compilado com cada uma delas, bem como um exemplo de estudo que a retratou.

Quadro 2: Características dos desenvolvimentos em NT

CARACTERÍSTICAS DOS DESENVOLVIMENTOS EM NANOTECNOLOGIA	EXEMPLO DE ESTUDO QUE ABORDA TAL CARACTERÍSTICA
Forte influência da estrutura no processo de produção	Linton e Walsh (2008)
Inovação baseada em processo (process-based innovation)	Maine, Lubik e Garnsey (2012)
Negócios baseados em ciência (science-based business)	Maine, Lubik e Garnsey (2012)
Padrão setorial de inovação: Science-based	Pavitt (1984)
Inovações demoram de 10-15 anos até gerar um produto comercial (ritmo lento)	Maine (2016)
Métodos de financiamento tradicionais para empresas de tecnologia (e.g capital de risco) não veem nanotecnologia como atrativo devido à demora no retorno financeiro	Maine (2013a)
Dificuldades e incertezas atreladas a viabilidade do <i>scale-up</i>	Tsusuki (2016)
Muitas variáveis para controlar no <i>scale-up</i>	Belcher et al (2013)
Necessidade de grande injeção de recursos financeiros durante muitos anos sem segurança sobre o retorno	Maine e Seegopaul (2016)
Dependência de grandes empresas e governos para o aporte de investimentos	Freeman (1997)
Grande número de variáveis influenciam os fenômenos em escala nanométrica	Di Sai (2020)
Deficiências na gestão de desenvolvimentos em nanotecnologia	Naseri e Davoodi (2011)
Desenvolvimentos mais suscetíveis ao Vale da Morte	Belcher et al.(2013)
Pouca experiência/conhecimento dos potenciais clientes em relação a nanotecnologia	Belcher et al. (2013)
Dificuldade de compreensão dos potenciais clientes sobre as soluções nanotecnológicas	Maine (2013a)
Caráter genérico das tecnologias que possibilita a aplicação em múltiplos mercados	Maine e Garnsey (2006)
Dificuldade em especificar um mercado/foco reduz a capacidade de execução	McGahn (2005)
Necessidade de focar em um mercado inicial estratégico (mercados de substituição e de menor risco) que não necessariamente é o mais rentável e o de real interesse	Maine, Lubik e Garnsey (2012a)

Necessidade de balancear a possibilidade de múltiplos mercados com os investimentos necessários até encontrar uma aplicação viável	Maine (2006)
Necessidade de customizar cada aplicação/funcionalidade para cada mercado e comprovar em escala	Maine e Seegopaul (2016)
Dificuldade em pivotar, comparado a desenvolvimentos tecnológicos em outras áreas	Boren, Chan e Musso (2012)
Não aplicabilidade de técnicas tradicionais de pesquisa de mercado	Bennett (2008)
Dificuldade em definir a abrangência adequada da proteção da propriedade intelectual	Belcher et al. (2013)
Busca pelo patenteamento da forma mais ampla possível	Maine (2013a)
Posição a montante (<i>upstream</i>) na cadeia de valor	Maine (2016)
Complexidade da cadeia de valor	Boren (2012)
Necessidade/dependência de inovações complementares	Maine e Garnsey (2006)
Utilização do método <i>spiral product development</i> para desenvolvimento de produtos.	Belcher et al. (2013)
Necessidade de co-desenvolvimento ou o estabelecimento de alianças com conhecedores do mercado	Maine (2013a)
Não possuir indicadores irrefutáveis que evidenciem a remoção do risco ao longo do tempo	Belcher et al. (2013)
Não possuem heurísticas para medir o aumento de valor quando algum risco é superado	Belcher et al. (2013)
Desafios de realizar experimentos de alta fidelidade com baixo custo e prazo	Maine (2013b)
Acesso a equipamentos de caracterização adequados	Richman e Hutchinson (2009)
Obstáculos e incertezas regulatórias durante o desenvolvimento tecnológico e comercialização dos produtos	Kaur et al. (2014)
Incertezas sobre aspectos de Saúde, Meio Ambiente e Segurança dos nanomateriais	Joint Research Centre (2017)

Fonte: A autora (2023)

2.4 Projetos de PD&I em NT e a escala TRL

Uma das formas de estimular o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos em áreas emergentes da ciência é a partir do investimento em projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I). O estabelecimento deste tipo de projeto está previsto no Art. 9º da Lei de Inovação (Lei 10.973/2004): “É facultado à ICT celebrar

acordos de parceria com instituições públicas e privadas para realização de atividades conjuntas de pesquisa científica e tecnológica e de desenvolvimento de tecnologia, produto, serviço ou processo (BRASIL, 2004)”.

Segundo Pimentel et al. (2010), projetos de PD&I sempre estão atrelados ao cumprimento de um plano de trabalho (com etapas e metas predefinidas), que possui um orçamento e envolve uma equipe de pesquisadores. Por visar inovação, o estabelecimento deste tipo de projeto exige um contrato de confidencialidade (PIMENTEL et al., 2010).

O apoio e/ou financiamento a projetos de cooperação entre instituições nacionais ou internacionais, a realização de editais via chamadas públicas, a alocação direta dos recursos em empresas, centros e/ou grupos de pesquisa com expertise na área, são algumas das formas mais frequentemente adotadas por agentes públicos e privados para a promoção de inovações.

Finep e CNPq são exemplos de agências públicas que investem, desde os anos 2000, recursos para o desenvolvimento da NT no Brasil (INOVAÇÃO, 2005). Em especial, em 2020 a Finep/MCTI realizou diversas iniciativas de apoio ao tema de materiais avançados e NT, a partir da publicação de uma série de chamadas públicas para financiamento de iniciativas nestas áreas (BELLUCCI; VASQUEZ; CONTI, 2021).

Entretanto, mesmo que não envolva apoio governamental, a realização de projetos de PD&I no contexto de parcerias entre universidades e empresas é vista como uma abordagem promissora para ambos os lados, por existir motivações e benefícios em diferentes esferas, como tecnológica, estratégica, financeira, educacional, política e epistemológica (MORA-VALENTÍN; NÁJERA-SÁNCHEZ; ORTIZ-DE-URBINA-CRIADO, 2022).

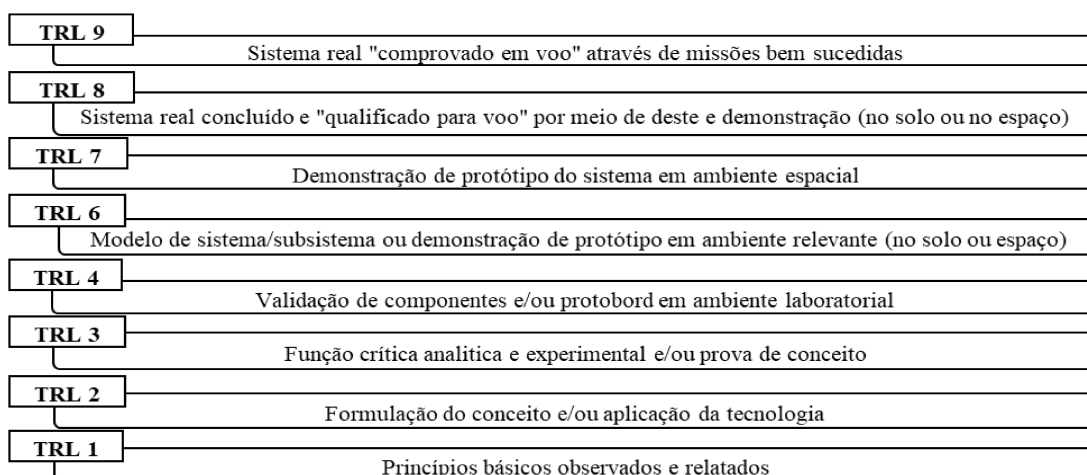
Seja a partir da obtenção de recursos públicos, financiamento privado ou público-privado, as propostas de projetos de são convencionalmente submetidas a diversas análises por parte dos detentores dos financiamentos. Neste sentido, para a avaliação de projetos de PD&I na área de NT, é comum encontrar iniciativas que importam métodos e técnicas que são consolidadas e utilizadas em outros contextos de projetos (tais como em indústrias já consolidadas, com menor teor de incertezas tecnológicas e mercadológicas).

Uma destas formas correntes de avaliação de projetos de NT e que consiste em uma prática bem difundida na área, é o emprego de escalas para mensurar o nível de maturidade atual do desenvolvimento e o que se pretende alcançar ao final do projeto. Neste sentido, a escala TRL é constantemente utilizada para embasar a tomada de decisão na seleção destes projetos. Exemplos de editais com a temática NT e que utilizam a escala TRL na avaliação de projetos podem ser vistos no tópico (i) do APÊNDICE 1.

Na literatura científica são encontradas uma grande variedade de escalas que objetivam mensurar o nível de maturidade de desenvolvimentos presentes em diversas áreas. Os Níveis de Maturidade Tecnológica, TRLs, ganharam destaque pela grande disseminação de sua utilização em nível mundial, sendo amplamente aceita (MOORHOUSE, 2001). Os TRLs são níveis que permitem a avaliação da maturidade de uma tecnologia (ESA, 2008). A escala é composta por nove níveis de maturidade tecnológica, utilizados para classificar a maturidade de um desenvolvimento de forma crescente à medida em que avança nos TRLs, sendo TRL1 o de menor maturidade e o TRL9, maior (MANKINS, 2009), vide Figura 9.

A motivação para o surgimento da escala ocorreu em 1960, diante do desafio da NASA de gerenciar, simultaneamente, dezenas de projetos tecnológicos, investimentos, cronograma e desempenho, bem como definir dentre um grupo de tecnologias passíveis de serem utilizadas para uma determinada aplicação, qual deveria obter financiamento (CERTI, 2021).

Figura 9: Escala TRL de acordo com Mankins (2009)



Fonte: Traduzido de Mankins (2009)

Para essa análise, era necessário compreender em qual estágio de desenvolvimento estava uma tecnologia, de forma esta pudesse ser comparada com as demais disponíveis. Com isso, esperava-se que a partir da avaliação da prontidão das tecnologias individuais, pudessem ser reduzidos riscos na alocação dos recursos financeiros e no planejamento dos projetos em desenvolvimento. Neste cenário, havia várias ferramentas de gestão disponíveis para avaliar a prontidão com ênfase no negócio, contudo nenhuma delas tinha como foco a análise do estágio de desenvolvimento que a tecnologia se encontrava (EARTO, 2014).

Foi neste contexto que se deu início ao desenvolvimento da escala TRL, na década de 70 - 80 (EARTO, 2014), com foco em sua utilização no setor aeroespacial (MANKINS, 1995). Todavia, em muitos casos, ela pode ser utilizada em um sentido mais amplo (ABNT, 2015; ISO/FDIS 16290:2013, 2013). Tal versatilidade da escala contribuiu para o surgimento de variações dela abrangendo peculiaridades de diferentes setores econômicos industriais (BUCHNER et al., 2019; DOD, 2011; DOE, 2009; EARTO, 2014; LEITE et al., 2015) além de escalas que abordam aspectos complementares à avaliação tecnológica (DOD, 2012; FISCHBACH, 2013; LIU et al., 2016; RYBICKA; TIWARI; LEEKE, 2016; SAUSER et al., 2006; SMITH, 2005). Mais informações sobre adaptações da escala TRL para diferentes setores e escalas complementares para a avaliação de aspectos não tecnológicos estão presentes nos tópicos (ii) e (iii) do APÊNDICE 1, respectivamente.

Segundo a EARTO (2014), para aplicações em contextos distintos do setor aeroespacial, a escala TRL deve ser bem compreendida para que possa ser utilizada adequadamente no planejamento de políticas de PD&I e programas de financiamento. O que pode implicar na realização de ajustes de suas definições ou entendimentos sobre os diferentes níveis de maturidade, visando torná-la operacional (EARTO, 2014).

A disseminação dos TRLs em diferentes contextos foi também potencializada pelo fato de que eles não só contribuem para a avaliação de maturidade de uma tecnologia particular, mas também permitem a comparação consistente da maturidade entre diferentes tipos de tecnologias (MANKINS, 1995). Isto é possível porque a escala fornece um padrão comum para medir e comunicar, de forma sistemática, a prontidão

de novas tecnologias ou novas aplicações de tecnologias existentes em um determinado momento do ciclo de vida do projeto (DOE, 2009).

Além de ser a ferramenta mais utilizada para avaliação de prontidão (BAKKE, 2017), os TRLs são também uma poderosa ferramenta de planejamento para a gestão da inovação (EARTO, 2014). Como potenciais justificativas, tem-se que a compreensão da maturidade/prontidão de uma tecnologia é fundamental para a tomada de boas decisões sobre a inclusão, desenvolvimento e integração de novas tecnologias em produtos visando sua comercialização (GOULART et al., 2020).

Muitas inovações de novos produtos entram em produção sem uma avaliação completa de sua prontidão tecnológica, resultando em perda de tempo, clientes insatisfeitos e perda de receitas (CLAUSING et al., 2010). Portanto, um método disciplinado para avaliar a prontidão tecnológica é visto como algo promissor para evitar que isso aconteça (CLAUSING et al., 2010).

Em resumo, o principal objetivo do uso das definições de TRLs é ajudar a gestão na tomada de decisões sobre o desenvolvimento e maturação da tecnologia em análise para garantir que ela possa desempenhar o papel pretendido no desenvolvimento do produto (DOE, 2009). Tal contribuição na análise e comparação entre diferentes tecnologias para uma melhor tomada de decisão, constitui como um dos motivos pelos quais agentes públicos e privados passaram a utilizar ativamente essa escala e suas variações. Conforme dito anteriormente, exemplos de editais com a temática NT e que utilizam a escala TRL na avaliação de projetos estão sinalizados no tópico (i) do APÊNDICE 1.

Essa ampla utilização corrobora com o que diz Olechowski (2020), que o TRL possui uma influência significativa no desenvolvimento tecnológico de diversas indústrias, alocação de investimentos e decisões gerenciais. Sendo que segundo o mesmo autor, evidências sugerem que a adoção da escala tende ainda mais a aumentar, porque seu uso está sendo continuamente imposto por regulações industriais, na avaliação de pesquisas e pedidos de financiamento e por clientes.

Como toda ferramenta, esta escala possui seus pontos fortes e também suas limitações (EARTO, 2014). A seguir será mostrada uma síntese de cinco delas, as principais identificadas na literatura: Necessidade de adaptação a diferentes

contextos, análise focada em uma tecnologia, necessidade de detalhamento, abordagem linear e restrita a aspectos tecnológicos.

A escala TRL não deve ser imediatamente aplicada a qualquer contexto. Segundo a EARTO, a escala proposta por Mankins (1995) deve ser adaptada para que possa ser utilizada em prol de atender aos objetivos de análise de financiamentos propostos por diferentes setores de toda a União Europeia, bem como o processo de tomada de decisão no ecossistema PD&I europeu (EARTO, 2014).

Tal cuidado também deve ser considerado ao aplicá-la para avaliar desenvolvimentos de uma área emergente como a NT no Brasil, pois a escala TRL foi desenvolvida em um contexto distinto, para uma indústria consolidada, a aeroespacial. Portanto, é necessário cautela ao utilizá-la considerando suas limitações para a aplicação imediata em indústrias diferentes dela (EARTO, 2014).

Os TRLs se concentram na avaliação de uma única tecnologia, o que dificulta a avaliação de projetos que propõem soluções que contemplem várias tecnologias (EARTO, 2014). Isso torna a avaliação ainda mais complexa em TRLs mais altos, que demandam a integração da tecnologia sob análise em um sistema composto por outras tecnologias individuais (e.g. TRL8: *System completed and qualified*). Entretanto, para que se alcance o próximo TRL (e.g. TRL9: *Actual system proven in operational environment*) o sistema como um todo deve ser comprovado.

Isso dificulta a avaliação de soluções mais complexas, como pode ser o caso de projetos de NT, que podem envolver sistemas com diversos componentes e tecnologias em diferentes níveis de maturidade (EARTO, 2014; OLECHOWSKI et al., 2020). O tópico (iv) do APÊNDICE 1 mostra uma estratégia sugerida na literatura para avaliar desenvolvimentos que envolvem mais de uma tecnologia.

O “como” a escala é apresentada aos mais diversos usuários é algo que influencia nas possíveis interpretações geradas. Um exemplo disso, é a escala adotada pelo programa *Horizon 2020*, Quadro 3. Esta foi apresentada pelo programa de forma sucinta, sem definições detalhadas e exemplificações, deixando-a aberta à múltiplas interpretações, o que implicou em diversas críticas por parte da EARTO (2014). Uma estratégia de detalhamento utilizada pela EARTO para lidar com tal situação está

apresentada no tópico (v) do APÊNDICE 1. Neste mesmo tópico também será mostrado um exemplo de detalhamento feito no Brasil pelo Sibratec NANO.

Dentro do cenário de uma indústria emergente, como a NT, é estratégico fornecer explicações adicionais para garantir uma compreensão mais precisa e alinhada sobre os TRLs. Isso ocorre porque, se o proponente do projeto não tiver clareza sobre o que compete a cada nível de maturidade tecnológica, a avaliação do nível de maturidade da tecnologia em questão também pode ser comprometida devido à potencial subjetividade decorrente de diferentes interpretações entre os diversos atores (BAKKE, 2017).

Quadro 3: Escala TRL utilizada pelo programa *Horizon 2020*

Escala TRL	Descrição
TRL 1	Princípios básicos observados
TRL 2	Conceito de tecnologia formulado
TRL 3	Prova experimental de conceito
TRL 4	Validade tecnológica em laboratório
TRL 5	Tecnologia validada em ambiente relevante
TRL 6	Tecnologia demonstrada em ambiente relevante
TRL 7	Demonstração de protótipo de sistema em ambiente operacional.
TRL 8	Sistema concluído e qualificado
TRL 9	Sistema real comprovado em ambiente operacional

Fonte: Traduzido de EARTO (2014)

Outro aspecto que tangencia a discussão sobre a escala TRL é que ela usa uma abordagem linear para pesquisa, desenvolvimento e implementação que é comum à visão predominante de inovação no início dos anos 1970 (EARTO, 2014). Entretanto, sabe-se que para avançar de um nível de maturidade para outro é necessário a realização de pesquisa, mesmo nos TRLs mais altos. Ou seja, uma tecnologia pode reduzir seu nível de maturidade temporariamente, para depois voltar a avançar

(EARTO, 2014). Tal situação pode ser vista como controversa diante de uma abordagem linear.

Uma das maneiras de se lidar com tal situação e, ao mesmo tempo, produzir uma escala mais concisa no que tange às classificações, é a partir da realização do agrupamento entre os níveis de maturidade tecnológica. Esta abordagem é utilizada por várias organizações, e pode ser vista com mais detalhes no tópico (vi) do APÊNDICE 1.

Inovação não é apenas sobre tecnologia (produto e processo), mas sim há outros aspectos que também importam para o sucesso comercial (HÉDER, 2017). A atenção a aspectos não tecnológicos como, por exemplo, a prontidão de uma inovação para ir ao mercado e a prontidão de uma organização para implementar a inovação, não estão presentes na escala original dos TRLs (EARTO, 2014). A escala tampouco provê informações sobre o esforço (tempo e recursos) que será demandado para atingir o próximo TRL e viabilidade real de atingi-lo, dadas as inúmeras incertezas que podem gerar bloqueios de rota. Estas informações são importantes para a tomada de decisões no planejamento e seleção de tecnologias (OLECHOWSKI et al., 2020a).

No entanto, sabe-se que a escala TRL não tem como finalidade avaliar o nível de maturidade em relação a aspectos não tecnológicos da solução. Nesse sentido, muitas instituições que adotaram a escala TRL começaram a empregar outros métodos para avaliar as dimensões não tecnológicas dos projetos propostos. Esta análise mais abrangente torna-se ainda mais interessante ao se tratar de uma indústria emergente como a NT, na qual o processo de conversão de descobertas básicas em produtos comercializáveis consiste em um longo e difícil ciclo de desenvolvimento (MAZZOLA, 2003).

Segundo a EARTO (2014) dimensões que não se limitam a tecnologia também devem ser consideradas na avaliação de projetos. Sendo que, dependendo da abordagem adotada, a importância destas dimensões pode acabar sendo subestimada, sendo este um cuidado que se deve tomar, inclusive, na avaliação dos desenvolvimentos de NT.

Diante disso, foram surgindo escalas que abordam diversos aspectos não tecnológicos da solução e que podem ser utilizados em conjunto com o TRL, como é

o caso do *Manufacturing Readiness Levels* (MRLs), entre outras. Conforme dito anteriormente, exemplos de utilização de escalas complementares para a avaliação de aspectos não tecnológicos podem ser vistos no tópico (iii) do APÊNDICE A.

3 GERENCIAMENTO DE PROJETOS COMPLEXOS

Uma abordagem potencialmente complementar e enriquecedora na busca por uma compreensão aprofundada e análise crítica sobre projetos na área de NT, complexa por natureza (DE VRIES, 2006), e que advém da literatura de gestão de projetos é o estudo de complexidade em projetos.

Segundo o PMI (2008), “projeto” é um esforço temporário e único empreendido para entregar um resultado. Trata-se de um conjunto único de atividades planejadas e com objetivos bem definidos, realizados dentro de um orçamento específico e em períodos pré-determinados (DE MEYER; LOCH; PICH, 2002). Tal definição é adotada na presente tese. Cada projeto é único e difere das operações de rotina de uma organização porque os projetos chegam a uma conclusão quando o objetivo é alcançado (PMI, 2022).

Já “complexidade” é uma característica de um programa ou projeto ou seu ambiente que é difícil de gerenciar, devido ao comportamento humano, do sistema e ambiguidade (PMI, 2014). Segundo o *International Center for Complex Project Management* (ICCPM), nem todos os projetos são complexos, mas todos os projetos têm um ciclo de vida e a maioria deles passará por um período de complexidade durante sua vida útil (ICCPM, 2022). Portanto, avaliar as complexidades envolvidas em um determinado projeto, pode contribuir para uma gestão ativa de suas dimensões (GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011).

A complexidade em projetos passou a ser um campo de investigação cada vez mais estudado por acadêmicos e praticantes (DE REZENDE; BLACKWELL; GONÇALVES, 2018). Tal aumento foi impulsionado por questões relacionadas à globalização, novas tecnologias, cadeias de suprimentos fragmentadas e a demanda para entregar projetos mais ambiciosos e mais caros (PMI, 2014). Ainda, segundo o *report* do ICCPM (BENSLEY; SMITH; BARBER, 2021), quando emergiu a pandemia de COVID 19 em 2019, diversos projetos e programas não foram imunes aos impactos deste evento que gerou volatilidade a nível global, inclusive em projetos complexos (BENSLEY; SMITH; BARBER, 2021). Isto contribuiu para discussões sobre como os líderes de projeto deveriam se posicionar a respeito, de forma a aproveitar as

oportunidades geradas e/ou lidar com os riscos e desafios existentes (BENSLEY; SMITH; BARBER, 2021).

Diante desse contexto, projetos que envolvem desenvolvimento tecnológico tornam-se cada vez mais complexos, englobando diversos *stakeholders*, ferramentas de engenharia e objetos sociotécnicos (BATES; CLAUSEN, 2020). Tal complexidade pode afetar um projeto de duas formas (SAN CRISTÓBAL et al., 2018): (i) dificultando seu entendimento e controle devido a emergência de novas propriedades que nenhum dos elementos do sistema conhece e (ii) através do aparecimento de um fenômeno que não poderia ser previsto, mesmo conhecendo o comportamento e interações dos elementos do sistema.

Isto irá influenciar o planejamento e o controle do projeto, podendo dificultar a identificação clara de metas e objetivos, a seleção de uma forma apropriada de elaborá-lo e executá-lo e até mesmo seus resultados (SAN CRISTÓBAL et al., 2018). Sendo assim, cabe ao gestor do projeto gerir a complexidade da forma adequada, de forma a saber aproveitar as oportunidades que emergem dela, como também evitar ou diminuir os efeitos negativos que ela pode gerar nos projetos (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

Entretanto, antes de estudar a gestão de projetos complexos, deve-se buscar entender no que consiste a CP. Diante disso, os tópicos a seguir tem como objetivo apresentar de forma ampla, mas não exaustiva, o que é retratado pela literatura desta área. Contudo, de antemão, vale ressaltar que estudos recentes reconhecem que esta área ainda possui diversos pontos de vista a se considerar, com diferentes visões sobre qual é de fato o conceito de complexidade que deve ser adotado (MIKKELSEN, 2020). Sendo que, segundo Mikkelsen (2020), grande parte destas visões são convergentes sob o seguinte aspecto: “*There is no commonly accepted definition*” (CHAPMAN, 2016, p. 477).

3.1 O que é complexidade em projetos

Este tópico utiliza os termos “complexidade em projetos” e “complexidade dos projetos” como equivalentes, por não se ter encontrado indícios suficientes na literatura para diferenciar os dois termos.

Historicamente há duas abordagens científicas de complexidade (VIDAL; MARLE, 2008). A primeira delas é conhecida como “complexidade descritiva” a qual considera a complexidade como uma propriedade intrínseca do sistema, instigando assim os autores da área a tentarem quantificá-la ou medi-la. Um exemplo de autor que adota tal abordagem é Baccharini (1996a).

A outra é conhecida como “complexidade percebida”, a qual considera a complexidade como subjetiva, já que a complexidade de um sistema pode ser entendida conforme a percepção do observador. De acordo com Vidal e Marle (2008), ambas abordagens podem ser aplicadas à complexidade do projeto e à complexidade do gerenciamento de projetos.

Segundo San Cristóbal et al. (2018) um gerente de projeto lida com a “complexidade percebida”, pois não consegue entender e lidar com toda a realidade e complexidade do projeto. Contudo, a forma que ele percebe e interpreta a complexidade pode resultar em diferentes tipos de complexidades no projeto.

Um estudo de revisão sobre os últimos 50 anos de pesquisa sobre o tema, indica que as pesquisas abordaram a temática complexidade em projetos a partir de quatro perspectivas: (i) complexidade do projeto; (ii) capacidades; (iii) desempenho e (iv) preocupações (DE REZENDE; BLACKWELL; PESSANHA GONÇALVES, 2018).

A primeira perspectiva revela que é possível analisar um projeto de diferentes dimensões: estrutural, incerteza, novidade, dinâmica, ritmo, complexidade sociopolítica e regulatória. A segunda perspectiva mostra que, para gerenciar um projeto complexo, é necessário construir capacidades relacionadas às pessoas, organizações e na cadeia de suprimentos e adotar estratégias para integrar, aprender ou selecionar a melhor solução. A terceira perspectiva revela que a busca constante de melhor desempenho e sucesso em projetos complexos, é impactada pela complexidade do próprio projeto e as capacidades desenvolvidas para lidar com ela. A quarta e última perspectiva destaca as preocupações dos pesquisadores em relação à complexidade do projeto, ou seja, a necessidade de planejamento, custo, alocação de recursos e problemas complexos de tomada de decisão.

Mesmo diante de tais perspectivas, de acordo com Baccharini (1996a) o conceito de complexidade do projeto recebeu pouca atenção por parte da literatura de gestão de

projetos até 1996. O autor é um dos mais citados na área, e discorre sobre o tema utilizando como referência o aumento da complexidade dos projetos de construções, principalmente desde a Segunda Guerra Mundial (BACCARINI, 1996a).

Segundo Cristóbal et al (2018) alguns autores costumam diferenciar “projetos complexos” de “projetos complicados”, de forma a levar em consideração o número de elementos contidos nos projetos e sua linearidade. Brockmann e Girmscheid (2007) alegam que a diferença entre projetos complicados e complexos está associada ao número de elementos em contraposição com as relações existentes entre os elementos. Projetos complicados envolvem uma maior quantidade de elementos. Enquanto projetos complexos envolvem muitas relações entre os elementos existentes, sendo que essas possuem fortes consequências na tomada de decisão. Por outro lado, Richardson (2008) associa projetos complicados com uma abordagem linear, enquanto projetos complexos com uma abordagem não linear, sendo que a não linearidade faz com que a relação entre os *inputs* e *outputs* seja difícil de se prever nesses projetos.

Estudos indicam que a existência de projetos complexos está associada à complexidade do conhecimento atrelado a ele, o que pode envolver diferentes elementos inter-relacionados, como, rotinas, indivíduos e tecnologias, que de modo interdependente estão vinculados a uma unidade única – o projeto (PENG et al. 2012; WINKELBACH; WALTER, 2015)

Tatikonda e Rosenthal (2000) veem a complexidade como as interdependências entre as tecnologias de produto e processo, novidades e dificuldade dos objetivos envolvidos no desenvolvimento. Enquanto Pich, Lock e De Meyer (2002) definem complexidade como a inadequação das informações, causada pela interação entre muitas variáveis do projeto.

Vidal e Marle (2008) definem a complexidade de um projeto como a propriedade do projeto que faz com que ele seja difícil de entender, prever e manter sob controle, mesmo que se tenha informações razoavelmente completas sobre o que este envolve. A complexidade de um projeto possui diferentes dimensões, que estão atreladas a aspectos relacionados ao seu tamanho, variedade, interdependência e contexto no qual está inserido. Esses autores evidenciam que, diferente do que se pensa, 70%

dos fatores relacionados à complexidade do projeto estão relacionados a aspectos organizacionais e não técnicos. Além de que a complexidade é um principais motivos da imprevisibilidade nos projetos, estando então associada aos problemas e falhas enfrentados (VIDAL; MARLE, 2008).

Tatikonda e Rosenthal (2000) referem-se à complexidade como as interdependências entre as tecnologias de produto e processo e a novidade e dificuldade de alcançar objetivos. Novamente, complexidade também é associada a interdependências entre a quantidade de fatores que influenciam em um projeto (WARD; CHAPMAN, 2003).

Remington e Pollack (2010) definem um projeto complexo como aquele que demonstra uma série de características em um grau ou nível de severidade que torna extremamente difícil prever os resultados do projeto, controlar ou gerenciar o projeto.

Tendo como referência o ponto de vista gerencial para a gestão da complexidade em projetos, Kim e Wilemon (2003) definem tal complexidade como as dificuldades e incertezas presentes nos esforços de desenvolvimentos, causadas pelo número de tecnologias/componentes/funções e pela natureza das tarefas organizacionais que indivíduos e organizações enfrentam no desenvolvimento de novos produtos.

Ahern, Byrne e Leavy (2014) ressaltam que esse cenário traz implicações para o planejamento de projetos complexos, pela impossibilidade de conseguirmos especificá-los e planejá-los completamente e com antecedência, exigindo dos envolvidos aprendizado contínuo ao longo do seu ciclo de vida. Além disso, compreender a complexidade de um projeto e como ela pode ser gerenciada é de suma importância para os gerentes de projeto, devido às diferenças associadas à tomada de decisões e ao alcance de metas que são influenciadas pela complexidade existente (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

Baccarini (1996a) defende uma definição de complexidade do projeto que, segundo ele, pode ser aplicada a qualquer dimensão do projeto (e.g. organização, tecnologia, ambiente, informação, tomada de decisão e sistemas) que seja relevante para seu gerenciamento: muitas partes variadas inter relacionadas³. Ainda, ele alega que a

³ “consisting of many varied interrelated parts (BACCARINI, 1996b, p. 201)”

complexidade do projeto pode ser operacionalizada em termos de “diferenciação” e “interdependência”.

Baccarini (1996a) ressalta também que, até 1996, a literatura de gestão de projetos falhou muito ao não indicar claramente durante as discussões sobre a presente temática, qual dimensão da complexidade do projeto estava sendo tratada, sendo que as mais comuns na literatura eram a “complexidade tecnológica” e “complexidade organizacional”.

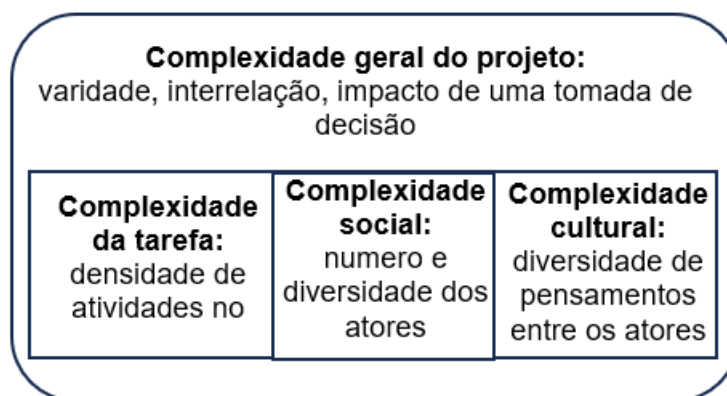
Por fim, vale ressaltar que o campo de pesquisa da CP evoluiu de diferentes trabalhos seminiais desconectados para uma discussão mais ampla e centralizada, focada em caracterizar e classificar projetos complexos para identificação de modelos e estruturas que possam auxiliar na gestão de projetos complexos (FRANCO, 2023). Diante disso, como objetos de pesquisa promissores para a geração de contribuições nesta área, está a análise de como as dimensões de complexidade podem ser utilizadas para analisar um projeto (DE REZENDE; BLACKWELL; GONÇALVES, 2018), e também a realização de estudos que analisam a complexidade durante a execução dos projetos, ao invés de abordagens retrospectivas (KIM; WILEMON, 2003). O tópico a seguir será dedicado a abordar quais são as dimensões de complexidade em projetos que foram identificadas na literatura estudada.

3.2 Tipos de complexidade em projetos

Este tópico utiliza os termos “tipos de complexidade”, “dimensões de complexidade” e “categorias de complexidade” como equivalentes, por não se ter encontrado indícios suficientes na literatura para diferenciar os três termos. Ainda, foi observado em alguns estudos que os autores utilizam estes termos de forma intercambiável.

Brockmann e Girmscheid (2007) fazem a diferenciação entre quatro tipos de complexidades, sendo a mais ampla a “complexidade geral do projeto”, que impacta na tomada de decisões envolvendo o mesmo. Dentro dela, estão localizados outros três tipos de complexidades: de “tarefas”, “social” e “cultural” (Figura 10). Artigos voltados para projetos de construções em larga escala, geralmente focam somente na dimensão da tarefa em si (GIDADO, 2010), o que foi sinalizado por diversos autores (BROCKMANN; GIRMSCHIED, 2007; GIRMSCHIED, GERHARD BROCKMANN, 2008).

Figura 10: Tipos de complexidade - tarefas, social, cultural e geral do projeto



Fonte: Traduzido de Brockmann e Girmscheid (2007)

Geraldi, Maylor e Williams (2011) publicaram um artigo de revisão no qual foram identificadas cinco dimensões principais para a complexidade. Cada dimensão foi desdobrada nos atributos que a constituem.

A primeira dimensão identificada foi a “complexidade estrutural”, sinalizada pelos autores como o tipo de complexidade mais mencionado na literatura. Segundo Williams (1999) a complexidade estrutural é definida como o grande número de elementos distintos e suas interdependências. Ela está associada a tamanho (número), variedade e interdependência (GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011).

“Incerteza” é o segundo tipo de complexidade retratado por Geraldi, Maylor e Williams (2011). Segundo os mesmos autores, o conceito de incerteza e sua relação intrínseca com os riscos tem estado presente na literatura de gestão desde a década de 1920, sendo que existem diferentes maneiras de defini-la. Como os principais atributos de incerteza identificados na literatura, Geraldi, Maylor e Williams (2011) ressaltaram o aspecto de novidade (absoluta), que pode estar associado ao desenvolvimento de uma tecnologia de fronteira ou o estabelecimento de uma estrutura contratual incomum.

“Complexidade dinâmica” consiste em outro tipo de complexidade, mas menos desenvolvido e específico do que os de complexidade estrutural. Dinâmico é um comportamento predominante de sistemas complexos (GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011). A dinâmica se refere às mudanças que ocorrem nos projetos, tais como nas especificações dos produtos, da equipe de gestão, fornecedores ou no ambiente. Tais mudanças podem levar o projeto a altos níveis de desordem,

retrabalho ou ineficiência, quando as mudanças não são bem comunicadas ou assimiladas pela equipe e demais envolvidos.

O “ritmo” de execução do projeto é outro tipo importante de complexidade, pois consiste na taxa a qual os projetos devem ser entregues, em relação a alguma referência específica do projeto. Tal dimensão também é de suma importância, já que a urgência e criticidade do alcance das metas no tempo requerem diferentes estruturas e atenção gerencial (GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011).

“Complexidade sócio-política” é apresentada por Geraldi, Maylor e Williams (2011) como um tipo fácil de complexidade para ser conceituada, mas difícil de operacionalizar. Pois ela surge como uma combinação de aspectos políticos e emocionais envolvidos nos projetos. Mesmo assim, são definidos quatro atributos que a integram: importância de algo, auxílio necessário de um determinado *stakeholder*, convergência entre opiniões, interesses e transparência dos interesses dos envolvidos no projeto.

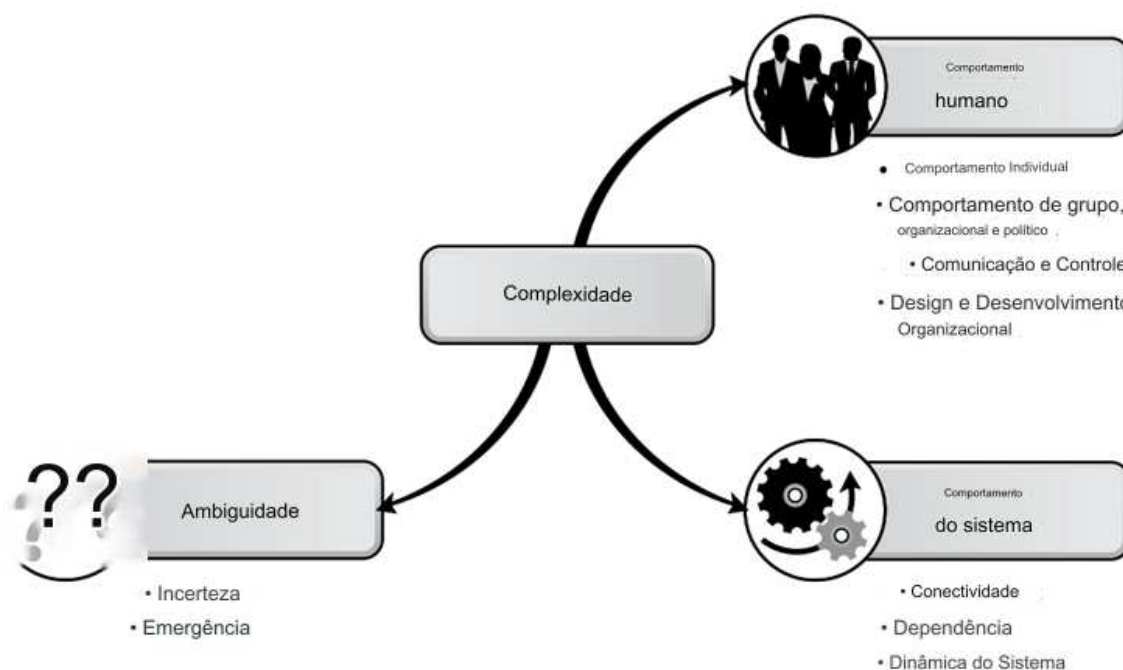
De acordo com Pollack e Remington (2010) identificar claramente qual tipo de complexidade está contida no projeto auxilia a seleção da forma apropriada de gerir-lo. Inicialmente, esses autores classificam a complexidade em quatro dimensões. A primeira delas é a “complexidade estrutural” que está associada ao alto número de atividades interconectadas que são desenvolvidas no projeto, bem como muitos parceiros e *stakeholders*. A “complexidade técnica” é outro tipo encontrada principalmente em projetos de P&D, por possuírem aspectos técnicos desconhecidos ou até então não experimentados, que geram complexidade devido à incerteza sobre os resultados que serão obtidos nesses projetos.

“Complexidade direcional” também é outra classificação adotada por Pollack e Remington (2010), a qual é com frequência encontrada em projetos cujo direcionamento foi alterado e quando está claro que deve ser feito algo para melhorar uma situação problemática gerada por esta alteração. Por fim, tem-se a “complexidade temporal” que surge em projetos que passam por alguma mudança legislativa não esperada ou rápidas mudanças tecnológicas, o que gera um alto nível de incerteza em relação a restrições futuras que podem desestabilizar o projeto. A ICCPM adiciona uma quinta dimensão que é a “complexidade sociocultural”. Segundo

eles, esta dimensão envolve as interações e necessidades humanas, diversidade, preconceito inconsciente, cultura organizacional e expectativas sociais existentes (ICCPM, 2022).

O PMI (2014) publicou um Guia Prático denominado “*Navigating Complexity*” com o objetivo de fornecer informações suplementares e instruções para a aplicação dos padrões do PMI a programas e projetos complexos. Este guia adotou três grandes categorias de complexidade (comportamento humano, comportamento do sistema e ambiguidade) e sinalizou que quase todas as causas de complexidade de um projeto ou um programa poderiam ser descritas em termos destas três categorias. As causas associadas a cada uma das três categorias estão indicadas na Figura 11.

Figura 11: Três categorias de complexidade e causas associadas



Fonte: Traduzido de PMI (2014)

3.3 Fontes de complexidade em projetos

Este tópico utiliza os termos “fontes de complexidade”, “fatores de complexidade” e “causas de complexidade” como equivalentes, por não se ter encontrado indícios suficientes na literatura para diferenciar os dois termos.

Diante da falta de consenso e dificuldade em definir complexidade em projetos, os estudiosos na área passaram a buscar a identificação e o entendimento de fatores

que contribuem e/ou aumentam a complexidade de um projeto, o que é fundamental para os gerentes de projeto (SAN CRISTÓBAL et al., 2018; VIDAL; MARLE, 2008).

Gidado (2010) elucida quatro diferentes fontes de complexidade: recursos empregados, ambiente, nível de conhecimento científico e tecnológico necessário e número de diferentes partes envolvidas no fluxo de trabalho. Ou seja, a grande quantidade de recursos necessários, um ambiente turbulento, a realização de um trabalho na fronteira tecnológica e muitas interações possíveis são certamente fatores que configuram projetos complexos (GIDADO, 2010).

Além de Gidado (2010) diversos autores discorrem sobre este tópico, o que inclui aspectos comuns e complementares às abordagens existentes. Entre os autores mapeados, um que fez uma ampla varredura na literatura de complexidade no projeto a partir de ao ano de 1996 foi Bosch-Rekveltdt (2011). Bosch-Rekveltdt (2011) fez uma extensa tabela com os elementos identificados na literatura que contribuem para a complexidade do projeto, vide Quadro 4.

San Cristóban et al, (2018) agrupam diversos dos elementos identificados por Bosch-Rekveltdt (2011) e incorpora estudos feitos após 2011. San Cristóban et al, (2018) fizeram uma síntese dos principais fatores identificados na literatura que afetam a complexidade de um projeto Quadro 5, utilizando classificações mais amplas que Bosch-Rekveltdt (2011). Na presente tese, os tópicos que irão explanar sobre as fontes de complexadas em projetos serão abordados considerando um agrupamento mais macro, inspirado no de San Cristóban et al, (2018). As fontes de complexidade identificadas com base na literatura estudada serão abordadas a seguir, seguindo tal estratégia de classificação/apresentação.

Quadro 4: Elementos identificados na literatura que contribuem para a complexidade do projeto

Elementos da literatura	Autores	Elementos definidos, ordenados alfabeticamente
Grau de definição de objetivo, escopo	Geraldi e Adlbrecht (2007); Crawford (2005); Vidal e Marle (2008)	Clareza de objetivos
Política interna da empresa (ambiguidade, informações ocultas) Variedade de métodos e ferramentas de gerenciamento de projetos aplicados	Geraldi e Adlbrecht (2007) Vidal e Marle (2008)	Suporte interno da empresa Compatibilidade de métodos e ferramentas de gerenciamento de projetos
Forma de contrato	Müller e Turner (2007); Geraldi e Adlbrecht (2007)	Tipos de contrato
Transparência do parceiro, empatia (a questão pessoal e intangível que melhora a cooperação)	Geraldi e Adlbrecht (2007)	Parceiro JV de cooperação
Inter-relação/interdependência de elementos	Geraldi e Adlbrecht (2007) Williams (1999); Vidal e Marle, (2008)	Dependências entre tarefas
Dependência de outros departamentos, empresas	Geraldi e Adlbrecht (2007); Williams (1999)	Dependências de outras partes interessadas
Novidade comercial do projeto (novos parceiros, equipe, processos, etc.)	Geraldi e Adlbrecht (2007)	Experiência com as partes envolvidas
Conhecimento (ou seja, educação e/ou treinamento)	Baccarini (1996)	Experiência com tecnologia
Multiobjetivos, com metas conflitantes	Williams (1999); Baccarini (1996); Thompson (1967); Vidal e Marle (2008); Geraldi e Adlbrecht (2007)	Alinhamento de metas
Impacto de uma mudança em um processo de produção em outros processos de produção	Tatikonda e Rosenthal (2000); Vidal e Marle (2008) Vidal e Marle (2008)	Inter-relações entre processos técnicos
Concorrência Novidade tecnológica do projeto	Geraldi e Adlbrecht (2007); Tatikonda (1999); Shenhar e Dvir (2004); Dewar e Hage (1978); Vidal e Marle (2008)	Nível de competição Novidade em tecnologia (mundial)
Número de disciplinas diferentes	Geraldi e Adlbrecht (2007); Baccarini (1996); Williams (1999); Vidal e Marle (2008)	Número de disciplinas diferentes

Número de idiomas diferentes	Geraldi e Adlbrecht (2007)	Número de idiomas diferentes
Número de culturas diferentes	Geraldi e Adlbrecht (2007); Vidal e Marle (2008)	Número de nacionalidades diferentes
Número de diferentes normas e padrões	Geraldi e Adlbrecht (2007); Vidal e Marle (2008)	Número de diferentes normas e padrões
Variedade de recursos financeiros	Vidal e Marle (2008)	Número de recursos financeiros
Variedade de objetivos	Geraldi e Adlbrecht (2007)	Número de gols
Diferenciação por território	Müller e Turner (2007); Moleiro (1973); Salão (1979); Vidal e Marle (2008)	Número de locais
Número de parceiros, contratados, fornecedores	Geraldi e Adlbrecht (2007); Baccharini (1996); Willians (1999); Ashby (1957); Vidal e Marle (2008)	Número de partes interessadas
Número de atividades	Vidal e Marle (2008)	Número de tarefas que se sobrepõem ao horário comercial
Diferenciação por tempo (ou seja, envolvido em momentos diferentes durante um projeto)	Baccharini 1996; Dewar e Hage (1978)	Influência política
Influência da política	Geraldi e Adlbrecht (2007)	Impulso do projeto
Agendamento	Thomas e Mengel (2008)	Duração do projeto
Duração do projeto	Xia e Lee (2005); Vidal e Marle (2008)	Conteúdo local obrigatório
Configuração da macroorganização (intervenientes locais)	Geraldi e Adlbrecht (2007)	Disponibilidade de recursos e habilidades
<small>Intervenientes</small>	Thomas e Mengel (2008); Baccharini (1996); Vidal e Marle (2008)	
Gerenciamento de riscos	Willians (2002)	Gerenciamento de riscos

Fonte: Traduzido de Bosch-Rekveltd (2011)

Quadro 5: Principais fatores que afetam a complexidade de um projeto

Fator	
Tamanho	Para considerá-lo um indício de complexidade, a estrutura organizacional do projeto deve estar acima de um tamanho mínimo crítico e seus elementos precisam estar inter-relacionados.
Interdependência e inter-relações	Um evento em uma estrutura interconectada pode causar efeitos totalmente desconhecidos em outra entidade dentro dela, a estrutura.
Metas e objetivos	Devem ser definidas de forma adequada e adequada, tanto a nível estratégico como a nível operacional.
Partes interessadas	O número de participantes do projeto e a forma como a informação flui entre eles são um fator chave que afeta a complexidade do projeto.
Práticas de gerenciamento	Relacionamentos entre participantes do projeto, fornecedores, sobreposição de atividades, métodos e técnicas são fatores que afetam a complexidade do projeto.
Divisão de trabalho	Adicionar estrutura organizacional ao projeto através da divisão do trabalho, a forma de seleção do pessoal e o nível de pressão sobre esse pessoal para atingir os objetivos do projeto são fatores que aumentam a complexidade do projeto.
Tecnologia	O escopo da tarefa ou a variedade de tarefas que precisam ser realizadas é a dimensão mais crítica da tecnologia. Explica por que é necessária uma variedade de tecnologias e um determinado nível de especialização em cada uma delas.
Engenharia simultânea	Ele quebra barreiras funcionais e departamentais ao integrar membros da equipe com diferentes formações disciplinares, muitas vezes conhecidas como equipes multifuncionais.
Globalização e dependência do contexto	A globalização aumenta a complexidade através da erosão das fronteiras, maior mobilidade, heterarquia e dinâmicas mais elevadas. Pode ser uma característica essencial da complexidade.
Diversidade	Um maior número de elementos e uma maior variedade entre elementos aumentam a complexidade. Expressa incerteza de significado em que múltiplas interpretações são plausíveis.
Ambiguidade	O fluxo é afetado por influências externas e internas. Implica também constante mudança e adaptação às condições em mudança.
Fluxo	

Fonte: Traduzido de San Cristóban et al. (2018)

- *Tamanho*

O tamanho da estrutura organizacional envolvida em um projeto é um componente que influencia sua complexidade, bem como a duração de um projeto (VIDAL; MARLE, 2008). Entretanto, para que este tamanho seja considerado um uma fonte de complexidade para o projeto, ele deve estar acima de um tamanho crítico mínimo, e deve-se ter interrelações entre os elementos que constituem o projeto (GFIC, 2002). Vidal e Marle (2008) associam o tamanho do sistema envolto no projeto a aspectos atrelados à complexidade em sua forma de organização e a complexidade do desenvolvimento tecnológico em questão.

- *Interdependências*

Vidal e Marle (2008) ressaltam que a presença de interdependências no projeto é um fator sinalizado por diversos autores como um dos mais relevantes para a complexidade de um projeto. Rodrigues (1996) critica que as abordagens tradicionais de gestão de projetos tendem a assumir que se cada elemento que compõe o projeto é entendido separadamente, então o projeto pode ser controlado como um todo. Contudo, segundo o mesmo autor, a experiência prática sugere que as relações estabelecidas entre os diferentes elementos que compõem o projeto são mais complexas do que aparentam, pois estas podem ser responsáveis por eventos inesperados.

Segundo San Cristóban et al, (2018) o número de sistemas e subsistemas que integram o projeto, as diferentes premissas metodológicas e filosóficas entre eles, as interdependências organizacionais e de cronograma entre as atividades e o envolvimento das partes interessadas são fatores-chave que influenciam a complexidade.

- *Objetivos e metas*

A incerteza em relação às metas que devem ser alcançadas em um projeto pode gerar mudanças ao longo do seu desenvolvimento, aumentando assim a complexidade do projeto como um todo (GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011). Para evitar que isso ocorra, os objetivos e metas devem estar bem definidos, tanto no nível operacional

quanto estratégico, e os envolvidos devem ter clareza a respeito dos mesmos (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

Contudo, mesmo que os objetivos e metas estejam bem definidos e as pessoas devidamente cientes, segundo Dao et. al, (2016) a dificuldade em alcançá-los também é outro elemento passível de geração de complexidade. Porque a presença de, por exemplo, metas agressivas ou um cronograma comprimido, pode fazer com que a equipe envolvida escolha adotar métodos mais complexos para conseguir atender aos objetivos do projeto.

- *Stakeholders*

O número de participantes do projeto e como as informações fluem entre eles são fatores-chave que afetam a complexidade do projeto (SAN CRISTÓBAL et al., 2018). A variedade desses *stakeholders*, os diferentes interesses de cada um, as relações estabelecidas entre eles e a localização geográfica são aspectos passíveis de geração de complexidades (SAN CRISTÓBAL et al., 2018; VIDAL; MARLE, 2008). Se o projeto for politicamente sensível e de alta visibilidade, a complexidade do projeto ainda pode aumentar consideravelmente (SAN CRISTÓBAL et al., 2018). A identificação desses fatores geradores de complexidades pode afetar no direcionamento dos esforços que deverão ser despendidos pela equipe na gestão de *stakeholders* específicos e/ou pode demandar a contratação de um gerente de projeto que seja habilidoso em trabalhar com esses *stakeholders* (GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011).

Segundo o PMI (2014), o comportamento dos *stakeholders* do projeto pode aumentar sua complexidade. Exemplos disso são as expectativas que esses possuem em relação ao projeto e o grau de entendimento destes sobre diferentes componentes do projeto (objetivos, benefícios, resultados, entre outros). Além disso, o PMI também ressalta que a troca de *stakeholders*-chave durante a execução do projeto é também um importante fator para aumentar a sua complexidade.

- *Práticas gerenciais*

A variedade de métodos e ferramentas de gerenciamento de projetos aplicados são vistas como uma potencial fonte de complexidade (VIDAL; MARLE, 2008). Estes

podem impactar nas relações estabelecidas entre os *stakeholders* e nos processos e atividades desenvolvidos (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

Um exemplo disso é “como” informações são compartilhadas com os *stakeholders*. Omitir e/ou postergar o compartilhamento de informações críticas no *timing* adequado às partes interessadas pode aumentar a complexidade de um projeto (PMI, 2014). Portanto, a utilização de estratégias de gerenciamento adequadas para controlar um conjunto diversificado de dimensões do projeto e as interfaces existentes que levam ao aumento da complexidade, tende a aumentar as chances do projeto ser bem-sucedido (DAO et al., 2016).

- *Divisão do trabalho e engenharia simultânea*

O “como” a organização realiza a divisão do trabalho entre os envolvidos é uma característica intrínseca para sua existência. Transladando tal visão institucional para um projeto, a forma de dividir as tarefas entre os profissionais envolvidos, a estratégia de seleção da equipe que irá executá-lo, bem como a pressão sob a qual esta equipe estará sujeita durante a operacionalização do cronograma, são aspectos que influenciam em sua complexidade (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

Uma tendência que vem crescendo devido a demanda pela execução de projetos cada vez mais rápidos é a engenharia simultânea. Este método preconiza a execução simultânea de diferentes estágios do projeto, ao invés de realizá-los consecutivamente (ENGINEERING, 2022). Dessa forma é reduzido o tempo de desenvolvimento do produto e conseqüentemente de colocá-lo no mercado, devido a maior produtividade no processo de desenvolvimento (ENGINEERING, 2022).

Esse aumento da pressão na execução de projetos leva muitas empresas a implantarem estruturas de projetos compostas por equipes distribuídas e/ou terceirizadas, que são cobradas por executar simultaneamente muitas atividades (KUNZ, 2022). Isso contribui para a quebra de barreiras funcionais e departamentais, a partir da interação de membros da equipe com diferentes *backgrounds*, gerando equipes multifuncionais. Tal aspecto também influencia a complexidade do projeto (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

- *Tecnologia*

Complexidade tecnológica foi definida por Baccarini (1996a) em termos de diferenciação e interdependências. A complexidade tecnológica devido a diferenciação se refere a diversidade de tarefas, múltiplos aspectos associados a uma tarefa (como vários *inputs/outputs*) e quantidade de envolvidos em sua execução (como por exemplo, subcontratações). Por outro lado, a complexidade tecnológica devido a interdependência está associada às interdependências entre tarefas que devem ser desempenhadas entre os envolvidos na sua execução. Além da interdependência entre diferentes tecnologias e *inputs* presentes no projeto.

No desenvolvimento de novos produtos, uma significativa fonte de complexidade é a tecnologia, principalmente quando uma tecnologia nascente está sendo desenvolvida e incluída em um novo produto (KIM; WILEMON, 2003). Novos produtos tendem a ser complexos porque geralmente não possuem somente uma função e não estão vinculados a somente uma tecnologia ou uma base de conhecimento. Quanto mais funções, tecnologias e bases de conhecimento envolvidas, maior é a complexidade. Além disso, empresas que desenvolvem novas tecnologias e produtos precisam, com frequência, acelerar seus esforços de desenvolvimento para permanecerem competitivas, o que pode também ser uma fonte de complexidade (KIM; WILEMON, 2003).

Outros aspectos que também influenciam a complexidade tecnológica de um projeto são as interdependências entre as especificações do produto que está sendo desenvolvido, as dependências dos processos tecnológicos presentes em seu desenvolvimento e o grau de inovação tecnológica em questão (VIDAL; MARLE, 2008). Considerando o que foi dito nos tópicos “tamanho do sistema do projeto”, “interdependências”, “objetivos e metas” e “tecnologia”, um exemplo comparativo elucidado por Kim e Willemon (2003) vale a pena ser apresentado.

Os autores alegam que o tamanho do projeto somente captura uma parte de sua complexidade. Tal fonte de complexidade deve ser analisada com cuidado pois, um projeto pode ser considerado grande, mas ter pequena interdependência entre as tecnologias e objetivos de baixa dificuldade. Outro projeto pode ser relativamente pequeno em tamanho, mas ter uma grande interdependência entre as tecnologias e objetivos de alta dificuldade. No segundo caso o projeto pode ser considerado mais complexo do que no primeiro pois, mesmo sendo menor, as interdependências e

desafios para o alcance dos objetivos e metas se sobressaltam (KIM; WILEMON, 2003).

De acordo com Cheah et. al (2021) projetos de P&D podem ser associados a diferentes graus de complexidade tecnológica a qual, por sua vez, pode afetar o potencial de comercialização e performance financeira. Neste contexto, os autores definiram a complexidade tecnológica dos projetos de P&D como o grau em que a tecnologia é sistêmica, possui múltiplas interações e é difícil de ser codificada.

Poucos estudos evidenciam como a complexidade tecnológica influencia as estratégias de inovação e a performance financeira dos projetos de P&D colaborativos entre instituições públicas e empresas (CHEAH; BELLAVITIS; MUSCIO, 2021). Segundo Cheah, Bellavitis e Muscio (2021), tecnologias de menor complexidade requerem menos experiência, possuem menores riscos e apresentam menos desafios em termos de coordenação e integração para atingir as metas de comercialização. Enquanto tecnologias mais complexas estão associadas com maiores barreiras tecnológicas. Esse é um aspecto central que respalda a importância de se realizar um alinhamento entre a complexidade tecnológica do projeto e os recursos necessários para sua execução (CHEAH; BELLAVITIS; MUSCIO, 2021; MADHOK, 2002).

Madhok (2002) alega que, para reduzir o risco associado à complexidade, as empresas podem complementar o conhecimento dos recursos humanos existentes com os de outros especialistas, acessando habilidades e conhecimentos externos, visando aumentar as capacidades internas. Ou envolver gestores seniores de alto nível, que devido a sua experiência podem compensar os aspectos negativos da alta complexidade tecnológica (CHEAH; BELLAVITIS; MUSCIO, 2021). Contudo, a opção por agregar tais profissionais deve analisada juntamente a complexidade do projeto, pois o custo de fazê-lo pode superar os benefícios gerados, caso o projeto seja de baixa complexidade (CHEAH; BELLAVITIS; MUSCIO, 2021).

- *Globalização, diversidade, ambiguidade e contexto*

A globalização, novas tecnologias e cadeias de suprimentos fragmentadas aumentam significativamente a complexidade dos projetos (PMI, 2014). Isto ocorre, pois, a globalização promove a flexibilização das fronteiras, fazendo com que o projeto possa ser executado em um ambiente mais dinâmico, com maior mobilidade e mais

possibilidades de interação (SAN CRISTÓBAL et al., 2018). Tal dispersão geografia do time do projeto, do cliente, fornecedores e outros *stakeholders* chave são passíveis de criar complexidades no que tange a comunicação e controle do projeto (PMI, 2014);

Ainda, o contexto em si e o ambiente em que o projeto é executado podem também influenciar sua complexidade (SAN CRISTÓBAL et al., 2018). Indivíduos de diferentes culturas possuem histórias, experiências e formas distintas de tomar decisões (CRISTÓBAL, 2017). Sendo assim, o compartilhamento de informações entre pessoas de diferentes regiões geográficas pode influenciar na forma de interpretação do conteúdo da informação transmitida, o que também é uma fonte de complexidade (VIDAL; MARLE, 2008).

Esse tipo de situação tem potencial para a geração de ambiguidades na comunicação entre os pares. A ambiguidade pode ser definida como pouca clareza sobre como interpretar as informações obtidas, devido a possibilidade de múltiplas interpretações são plausíveis, o que pode levar a existência de múltiplas situações, objetivos e processos, que possam ser conflitantes (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

A maior possibilidade de interações entre diferentes instituições e/ou entre diferentes grupos de uma mesma instituição, pode também contribuir para o aumento da complexidade de um projeto sob outro ponto de vista. Segundo o PMI (2014), a atuação dos indivíduos é motivada por benefício próprio, em benefício das organizações que eles representam ou daquelas que eles se identificam. Portanto, situações nas quais há fortes pressões políticas e/ou incentivos econômicos podem contribuir para que os envolvidos compartilhem informações falsas para alcançar seus objetivos, o que pode implicar no aumento da complexidade do projeto devido a esse tipo de comportamento.

Por fim, considerando que os projetos podem estar inseridos em contextos diversos, deve-se ter um cuidado especial em relação aos métodos e práticas adotados para gerir a complexidade em cada contexto. A utilização de métodos e práticas aplicados em um projeto executado em um contexto específico, deve ser cuidadosamente avaliada caso a caso, antes de utilizá-las em outros projetos com diferentes configurações institucionais, linguísticas e culturais (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

- *Fluxo*

O fluxo da realização de um projeto é uma variável que interfere em sua complexidade, pois ele pode implicar na realização de mudanças constantes para a adaptação em determinadas situações devido a motivações diversas. O fluxo pode ser afetado por influências externas, como mudanças políticas ou de mercado e também por influências internas, como mudanças na estratégia do projeto e do comportamento dos indivíduos envolvidos (SAN CRISTÓBAL et al., 2018).

A seguir, o Quadro 6 traz uma visão sintetizada sobre as fontes de complexidade abordadas na presente seção.

Quadro 6: Fontes de complexidade e exemplo de autores que as abordam na literatura

FONTES DE COMPLEXIDADE	EXEMPLO DE AUTORES QUE ABORDA TAL FONTE
TAMANHO: Tamanho da estrutura organizacional, tamanho do sistema que está sendo desenvolvido, tamanho e duração do projeto, entre outros.	Vidal e Marle (2008); Geraldi, Maylor e Willians (2011); Gidado (2010); Kim e Willeman (2003).
INTERAÇÕES E INTERDEPENDÊNCIAS: Interdependências entre elementos do projeto (sistemas, subsistemas), entre pessoas, organizações, atividades do cronograma e entre inputs e outputs.	San Cristóbal et al. (2018); Geraldi, Maylor e Willians (2011); Gidado (2010); Baccarini (1996); Pollack e Remington (2010); PMI (2014).
OBJETIVOS E METAS PROPOSTOS: Incerteza em relação às metas e objetivos previstos, dificuldade de alcançá-los (e.g. metas agressivas, cronograma longo).	Dao et al. (2016).
STAKEHOLDERS: Quantidade e variedade de participantes, relações e comunicação entre os participantes, visibilidade dos envolvidos (do projeto ou de pessoas politicamente sensíveis), comportamento e expectativas das pessoas envolvidas, nível de compreensão dos stakeholders sobre o projeto.	PMI (2014); Geraldi, Maylor e Willians (2011); Gidado (2010); Pollack e Remington (2010); PMI (2014); San Cristóbal et al. (2018).
GESTÃO DO PROJETO: Variedade de métodos e ferramentas de gerenciamento aplicados no projeto,	PMI (2014); ICCPM (2022); Dao et al (2016); San Cristóbal

o quão adequado estão as estratégias de gestão das interfaces e da comunicação entre os envolvidos.	et al. (2018); Vidal e Marle (2008).
DIVISÃO DO TRABALHO: Seleção da equipe que irá executar o projeto, forma de dividir as tarefas entre os membros da equipe, pressão durante a operacionalização do cronograma, presença de diferentes profissionais com backgrounds distintos.	San Cristóban et al. (2018); Baccarini (1996); PMI (2014).
TECNOLOGIA: Diferentes graus de complexidade tecnológica podem afetar o potencial de comercialização e performance financeira. A complexidade tecnológica está associada a: diversidade de tarefas, múltiplos aspectos associados a uma tarefa (como vários inputs e outputs), quantidade de envolvidos em sua execução técnica (como por exemplo, subcontratações), diversidade de funções de um produto e de tecnologias vinculadas a ele, diversidade de bases de conhecimentos necessários o desenvolvimento do produto, velocidade na qual o desenvolvimento tecnológico é feito, interdependência entre as especificações do produto e seu grau de inovação.	Cheah et. al (2021); Geraldi, Maylor e Willians (2011); Gidado (2010); Baccarini (1996); Pollack e Remington (2010); PMI (2014); Baccarini (1996).
GLOBALIZAÇÃO E CONTEXTO: Dispersão geografia do time do projeto, do(s) cliente(s), fornecedor(es) e outros stakeholders. Pluralidade de elementos envolvidos no projeto, diferentes culturas, ambiguidades na comunicação, interações entre diferentes instituições e grupos com interesses distintos.	Vidal e Marle (2008); Pollack e Remington (2010); San Cristóban et al. (2018).
FLUXO DO DESENVOLVIMENTO: Necessidade de realizar mudanças e adaptações para atender a motivações e fatores externos (mudanças políticas ou de mercado) ou internos diversos (mudanças na estratégia do projeto e comportamento dos indivíduos).	San Cristóban et al, (2018); Kim e Willeman (2003); Geraldi, Maylor e Willians (2011).

Fonte: A autora (2023)

4 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

As conexões potenciais entre as literaturas de NT (com o recorte em projetos de PD&I) e CP constituem a oportunidade de investigação deste estudo que visa responder a seguinte questão de pesquisa: **Como caracterizar complexidade em projetos de PD&I na área de NT?** O recorte adotado consiste em projetos PD&I de NT, com foco em ciência dos materiais, realizados através de parcerias entre U-E. Os motivos que justificam tal recorte como um bom campo de estudo serão retratados a seguir.

Kim e Wilemon (2003) afirmam que os estudos de CP trazem majoritariamente uma abordagem retrospectiva da complexidade, ao final do desenvolvimento. Por outro lado, este estudo se propõe a analisar a complexidade durante o processo de desenvolvimento de novos produtos nanotecnológicos, visando contribuir para a compreensão de como ela é vivenciada, suas causas e antecipação de seus efeitos. Segundo o PMI (2014) é este o ponto de partida para lidar com os desafios da CP e, de acordo com Kim e Wilemon (2003), as organizações que possuem conhecimento sobre a natureza da complexidade com que lidam, podem desenvolver a capacidade de gerenciá-la não só para minimizá-la, mas também para se beneficiarem competitivamente.

Para tal, neste estudo a CP é definida como a “Presença de múltiplos elementos interconectados, incertezas, restrições e interdependências que tornam a prospecção, execução e gestão do projeto desafiadora e difícil de ser compreendida e gerenciada”. Ela é uma medida da interconexão, interdependência e variedade de elementos que compõem um projeto, bem como dos desafios e impactos que surgem dessas interações.

Conforme sinalizado anteriormente, a CP pode surgir de várias fontes, como a natureza do projeto, a tecnologia envolvida, o ambiente interno e externo, as partes interessadas, as restrições de recursos, entre diversas outras. Diante de tal vastidão de fontes de CPs, o presente estudo optou por adotar uma tipologia mais macro para retratá-las, inspirada na de San Cristóbal et. al (2018). Sendo assim, as fontes de CPs identificadas com base na literatura estudada serão abordadas seguindo tal estratégia de classificação/apresentação.

A análise de complexidade proposta no presente trabalho está pautada em projetos de PD&I realizados nas parcerias entre U-E na área de NT, com foco em ciência dos materiais, por alguns motivos que serão abordados a seguir.

Um deles consiste na premissa que a quantidade de organizações envolvidas em tais desenvolvimentos sempre será maior ou igual a dois, sendo tal fator uma potencial fonte de “complexidade organizacional”. Conforme indicado por diversos estudiosos na área de CP, quanto maior for a quantidade de organizações distintas e diversas envolvidas em um projeto, maior será sua complexidade organizacional. Ainda, vale ressaltar que diversos desenvolvimentos na área de NT envolvem também um terceiro ator além da universidade e empresa, tal como um agente financiador complementar e/ou uma fundação de apoio.

Universidades e empresas são organizações intrinsecamente distintas por terem diferentes razões para existirem. Contudo, elas possuem grande potencial colaborativo, dependendo da estratégia de trabalho estabelecida entre elas. A realização de projetos de PD&I no contexto de parceria entre essas instituições pode ser uma abordagem promissora para ambos os lados, por envolver motivações e benefícios em diferentes esferas: tecnológica, estratégica, financeira, educacional, política e epistemológica (MORA-VALENTÍN; NÁJERA-SÁNCHEZ; ORTIZ-DE-URBINA-CRIADO, 2022). Diante disso, estudar a CP firmados entre esses atores pode ser uma rica fonte para a obtenção de informações sobre a complexidade existente no estabelecimento e manutenção de tais arranjos tão estratégicos para o desenvolvimento das NTs.

No que tange ao recorte voltado para a área de NT, este pode ser justificado pela necessidade de robustecer o olhar externo em relação aos desafios enfrentados no dia a dia na operacionalização de desenvolvimentos tecnológicos nesta área. Conforme respaldo obtido a partir da revisão de literatura apresentada, e de acordo com a experiência prática da autora do presente estudo, projetos de PD&I em NT possuem características peculiares ainda pouco reconhecidas e, por consequência, contribuem para sua complexidade ser subestimada.

Neste sentido, vale enfatizar a relevância da “complexidade técnica”, associada ao desconhecimento e/ou ao pouco domínio dos fenômenos que se manifestam na

escala nanométrica. A “complexidade estrutural” também se faz presente, por se tratar de uma área de fronteira tecnológica, na qual os desenvolvimentos e a grande amplitude de possíveis aplicações são constantemente testadas, tanto em indústrias já consolidadas quanto em mercados emergentes. O que demanda forte e constante alinhamento entre a área técnica e de mercado durante um longo ciclo de desenvolvimento, com duração superior aos empreendimentos de tecnologia mais amplamente estudados e com menor facilidade de pivotar (como aqueles construídos para explorar desenvolvimentos tecnológicos em eletrônicos, computadores e *software*).

Ademais, como projetos de PD&I em NT contemplam, inclusive, atividades de pesquisa, atreladas a desenvolvimentos que se iniciam com baixo nível de maturidade tecnológica, a determinação de metas e objetivos claros também se torna um aspecto sensível devido à dificuldade de prever o que é passível de ser alcançado. Isso é ainda mais sensível quando os pesquisadores se deparam com financiadores que estabelecem e cobram o cumprimento de metas “SMART”, acrônimo para as seguintes palavras em inglês: *Specific, Measurable, Attainable, Relevant e Time-Based*. Dessa forma, emergem aspectos atrelados à “complexidade direcional”, ou seja, projetos que apresentam desafios na determinação e/ou disseminação de metas e objetivos entre os *stakeholders*.

Por fim, por ser uma área emergente, ainda com pouca regulamentação sobre aspectos de SMS e pouco conhecimento prático sobre o impacto da utilização dos nanomateriais em longo prazo, pode-se dizer que o ambiente de desenvolvimento de projetos de NT pode ser considerado como incerto, o que evidencia aspectos atrelados à “complexidade temporal”.

Ante ao exposto sobre o potencial do estudo da CP de PD&I em NT, bem como diante da necessidade de compreender em profundidade como se dá a influência da complexidade em tais desenvolvimentos, a presente tese tem como objetivo geral: caracterizar a CP de PD&I realizados nas parcerias entre U-E na área de NT com foco em ciência dos materiais. Para isso, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- (i) caracterizar os desenvolvimentos em NT e formas correntes de avaliação de projetos nessa área;

- (ii) codificar elementos de complexidades nas literaturas de gestão da CP e desenvolvimento de produtos nanotecnológicos e agrupá-los em macro dimensões;
- (iii) buscar e selecionar um ambiente para a pesquisa de campo, no qual seja possível obter informações em profundidade sobre os desafios enfrentados nos projetos de PD&I em NT;
- (iv) avaliar e validar com lideranças de projetos de PD&I na área de NT, quais elementos de complexidade são mais convencionalmente presenciados por eles neste tipo de projeto e
- (v) construir um *template* dos elementos de complexidade mais significativos presentes em projetos de PD&I na área de NT em ciências dos materiais.

5 METODOLOGIA

Segundo o PMI (2014) o ponto de partida para lidar com os desafios da CP consiste em entender como ela é vivenciada, suas causas e antecipação de seus efeitos. Sendo assim, será apresentado a seguir o ambiente escolhido para a pesquisa de campo na área de NT em ciência dos materiais (tópico 5.1). Posteriormente, é feita uma explanação da abordagem metodológica utilizada, bem como os motivos para tê-la adotado (tópico 5.2). Por fim, será detalhado o passo a passo da condução do estudo (tópico 5.3).

5.1 O Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno da UFMG

Centros de pesquisa com um foco tecnológico específico, como é o CTNano/UFMG para a área de NT, são essenciais para a promoção de inovações a partir da interação com o meio empresarial, devido a sua produção científico-tecnológica em setores estratégicos para o País (MEDEIROS, 2020).

O CTNano/UFMG é um Centro de Tecnologia em Nanomateriais vinculado à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), cujo foco é o desenvolvimento tecnológico — de produtos, processos e serviços — envolvendo nanomateriais. Ele foi fundado em 2010 a partir de um projeto de pesquisa da UFMG, mas as sementes dessa iniciativa já haviam sido plantadas há alguns anos através do estabelecimento de parcerias internacionais e o consequente pioneirismo em pesquisas na área de nanotecnologia no Brasil.

Figura 12: Foto do CTNano/UFMG



Fonte: CTNano/UFMG (2023).

Seus idealizadores participaram da fundação de iniciativas de referência relacionadas à NT no país, como o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Nanomateriais de Carbono (INCT de Nanomateriais de Carbono). Esse histórico de pioneirismo contribuiu para a idealização do Centro que teve seu início em 2009, a partir do desdobramento de resultados de um projeto de pesquisa realizado entre a UFMG e uma empresa pública nacional.

Em 2011, a iniciativa tomou maior envergadura a partir de sua formalização através da parceria entre a UFMG, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), uma empresa pública nacional e uma empresa privada (respectivamente do setor de óleo e gás e outra da indústria cimenteira), por meio da submissão do projeto do CTNano/UFMG ao Fundo Tecnológico (FUNTEC) — linha de financiamento do BNDES que mais tarde resultaria em um grande investimento.

Tal investimento foi uma grande fonte de recursos para CTNano/UFMG, que até julho de 2018, já havia captado cerca de 42,8 milhões de reais, para investimentos em infraestrutura e manutenção da equipe executora. Neste contexto, havia três linhas de desenvolvimento tecnológico financiadas pelos recursos do FUNTEC e das empresas parceiras envolvidas: nanocompósitos poliméricos, cimento nanoestruturado e síntese de nanomateriais de carbono. Além de duas linhas de suporte a estes desenvolvimentos: caracterização e SMS. Em conjunto, essas linhas totalizavam oficialmente 5 desenvolvimentos tecnológicos de PD&I: resina epóxi nanoestruturada, resina poliuretana nanoestruturada, cimento Portland nanoestruturado, cimento classe G nanoestruturado e nanotubos de carbono de múltiplas paredes.

Mesmo com a grande quantia de recursos conquistados através do FUNTEC, este tem como término outubro de 2023. Com a existência de tal deadline, emergiu a necessidade de o CTNano/UFMG obter recursos complementares aos advindos do FUNTEC para garantir sua sobrevivência em longo prazo. Tal cenário contribuiu para que o Centro adotasse uma postura proativa em relação à captação de recursos, o que originou impactos em toda a organização.

As lideranças do CTNano/UFMG passaram a atuar ativamente na captação de projetos de PD&I em parceria com empresas. Por mais que o processo de captação seja demorado, superior a 1 ano, e a grande maioria dos contatos não são convertidos

em projetos, o CTNano/UFMG conseguiu estabelecer parcerias com diversas empresas. Em abril de 2022 o CTNano/UFMG já havia conseguido estabelecer 35 projetos de PD&I em NT na área de ciência dos materiais, estando parte deles ainda em execução durante a elaboração desta tese.

O CTNano/UFMG possui quatro frentes de pesquisa: Frente de Síntese de Nanomateriais, Frente de Nanocompósitos Poliméricos, Frente de Materiais Metálicos e Frente de Materiais Cimentícios e Cerâmicos. Estas fazem desenvolvimentos tecnológicos e desenvolvimento de produtos com nanomateriais que vão do TRL 3 ao TRL 6-7 (RESENDE et al., 2017).

O Centro também conta com a atuação de três frentes transversais às frentes de pesquisa supracitadas: Frente de Operações, Frente de SMS e Frente de Caracterização de Nanomateriais. Estas três frentes atuam no suporte ao desenvolvimento dos projetos do CTNano/UFMG, cada uma em sua respectiva área.

A Frente de Operações atua na gestão do dia a dia do Centro, bem como na gestão de projetos de PD&I firmados. A Frente de SMS atua na orientação dos colaboradores no que tange a aspectos de SMS na manipulação de nanomateriais e descarte, além de ensaios de toxicidade com bioindicadores e análise do ciclo de vida dos desenvolvimentos tecnológicos. A Frente de Caracterização atua na realização de análises de caracterização para todos os projetos no Centro, utilizando como base a infraestrutura de equipamentos presentes no CTNano/UFMG.

Considerando este portfólio de projetos e o fato de que a coleta de dados referente ao presente estudo ocorreu entre fevereiro e junho de 2022, vale ressaltar alguns aspectos:

- Até o término da coleta de dados, totalizavam 13 empresas parcerias em projetos de PD&I que executaram/executam projetos com o CTNano/UFMG;
- Das 13 empresas parcerias do Centro, pelo menos cinco delas já executaram ou executam mais de um projeto de PD&I com o CTNano/UFMG;
- São áreas de atuação das empresas que compõem/comuseram o portfólio de projetos do CTNano/UFMG: petróleo e gás, metal mecânico, têxtil, químico,

mineração, manufatura aditiva, papel e celulose, refratários, aviação, construção civil e diagnósticos⁴;

- Até o momento em que foram realizadas as entrevistas, os TRLs alcançados pelos 14 projetos que foram objeto de estudo desta tese eram: (i) dois deles, 14% dos projetos, estavam no TRL 3; (ii) nove deles, 65% dos projetos, estavam no TRL 4; (iii) um deles, 7% dos projetos, estava no TRL 5 e (iv) dois deles, 14% dos projetos, estavam no TRL 6⁵;
- Recentemente, o CTNano/UFMG também passou a estreitar relações com suas *spin-offs* para a realização de desenvolvimentos em parceria, sendo que esta é uma das formas que o Centro utiliza para estreitar laços com tais empresas;
- O CTNano/UFMG possui quatro *spin-offs*, são elas: NanoView Nanotecnologia, Ipol Nanotecnologia, Neotek e Eco Carbono;
- Além das *spin-offs* e empresas parcerias em projetos de PD&I o CTNano/UFMG também possui cerca de 14 instituições parceiras e apoiadoras da iniciativa, entre elas duas fundações que atuam como intervenientes nos projetos firmados com parceiros industriais, a Fundação de Apoio da UFMG (FUNDEP) e Fundação Christiano Ottoni (FCO).

Diante deste histórico de sucesso do CTNano/UFMG no estabelecimento de parcerias para projetos de PD&I entre U-E em NT na área de ciência dos materiais, do fato do CTNano/UFMG ter três frentes que apoiam os desenvolvimentos tecnológicos em aspectos mapeados como críticos para desenvolvimentos em NT e da facilidade de acesso às informações, optou-se por ter os projetos do Centro como referência para a realização da pesquisa de campo deste estudo. Além disso, a autora desta tese tem amplo acesso às lideranças do Centro, responsáveis pela coordenação, gestão e

⁴ Os setores das empresas financiadoras dos projetos que foram objeto do presente estudo correspondem a uma parcela destes setores, isto é: petróleo e gás, mineração, papel e celulose, metal mecânico, refratários e aviação.

⁵ Dois dos projetos que estavam em TRL 6 possuíam testes do protótipo em ambiente operacional (TRL 7), mas ainda não haviam concluído tais testes.

execução dos projetos desenvolvidos nele, o que contribuiu para a realização de uma análise em profundidade dos casos estudados.

5.2 Abordagem metodológica escolhida: *flexible pattern matching*

5.2.1 Pesquisa qualitativa: confiabilidade e validade

A pesquisa qualitativa pode fornecer ricos insights para entender as mudanças das empresas, contextos sociais e desenvolvimento de tecnologias (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021). Ela pode ser definida como uma forma de pesquisa na qual um(s) pesquisador(es) ou pesquisadores(es) designado(s) coleta(m) e interpreta(m) dados, tornando o pesquisador(es) tão parte do processo de pesquisa quanto os participantes e os dados que eles fornecem (CORBIN; STRAUSS, 2019). Esta tem sido vista como uma poderosa forma de esclarecer questões relativas à experiência dos atores estudados, sendo cada vez mais reconhecida por financiadores de pesquisa e formuladores de políticas (O'CONNOR; JOFFE, 2020). Desta forma, ela desempenha um papel cada vez mais poderoso na criação de conhecimento em estudos nas áreas de gestão (PRATT; KAPLAN; WHITTINGTON, 2020).

A pesquisa qualitativa produz conteúdo e descobertas que não são alcançadas por procedimentos estatísticos ou outros meios de quantificação (CORBIN; STRAUSS, 2019; PRATT; KAPLAN; WHITTINGTON, 2020). Isto contribui para a constante preocupação do pesquisador em respaldar no meio acadêmico a qualidade da pesquisa desenvolvida (O'CONNOR; JOFFE, 2020).

Na literatura, várias abordagens diferentes são discutidas a respeito de formas de avaliação das pesquisas qualitativas — ver Creswell e Miller (2000), Denzin e Lincoln (1998), Lewis (2009), Lincoln e Guba (1985) e Merriam (1998). Segundo Ang, Embi e Yunus (2016), uma de grande popularidade é a inicialmente proposta por Lincoln e Guba (1985) que redefiniram confiabilidade (*reliability*) e validade (*validity*) da pesquisa qualitativa como um conceito paralelo de “*trustworthiness*”, que consiste em quatro aspectos/critérios: credibilidade, transferibilidade, confiabilidade e confirmabilidade (Quadro 7). Mais tarde, Guba e Lincoln (1994) expandiram este conjunto para cinco critérios: credibilidade, transferibilidade, confiabilidade, confirmabilidade e autenticidade.

Quadro 7: Aspectos que respaldam "trustworthiness" na pesquisa qualitativa

Credibilidade - Confiança na veracidade das descobertas;
Transferibilidade - Mostrar que os resultados têm aplicabilidade em outros contextos;
Dependabilidade - Mostrar que as descobertas são consistentes e podem ser repetidas;
Confirmabilidade - Grau de neutralidade ou até que ponto os resultados do estudo são moldados pelos respondentes e não pelo viés, motivação ou interesse do pesquisador.

Fonte: Adaptado de Lincon e Guba (1985)

A presente tese se apoia na abordagem Lincoln e Guba (1985), bem como está em sinergia com Morse *et. al* (2002), que argumentam que confiabilidade e validade permanecem como conceitos apropriados para atingir o rigor na pesquisa qualitativa. Os últimos, sugerem que os pesquisadores envolvidos em estudos qualitativos devem reivindicar a responsabilidade pela confiabilidade e validade, implementando estratégias de verificação e autocorreção durante a condução do estudo. Tal abordagem pode ser vista em vários estudos mais atuais como, por exemplo, em Ahmad-tajuddin (2015) que retrata as estratégias utilizadas na pesquisa para garantir cada um dos critérios apontados por Lincoln e Guba (1985).

De modo mais abrangente, o artigo de Pratt, Kaplan, Whittington (2020) traz uma tabela-síntese dos meios que uma pesquisa qualitativa pode adotar para estabelecer "trustworthiness" e ser considerada uma pesquisa de qualidade. Mais especificamente, em relação ao recorte dado à abordagem de Lincoln e Guba (1985), os autores apresentam cada um dos quatro critérios, as questões que definem cada um deles, bem como estratégias práticas que podem ser utilizadas para garanti-los durante a pesquisa, Tabela 1.

Tabela 1: Meios para estabelecer "trustworthy" na pesquisa qualitativa

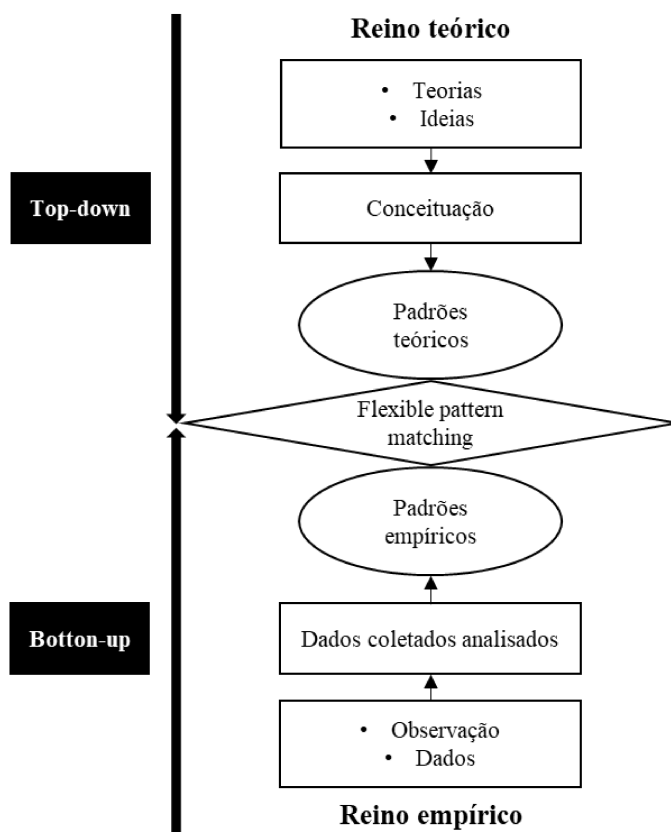
Posição (e fonte principal)	Característica	Definindo perguntas	Práticas ilustrativas
Investigação naturalística (Lincoln e Guba, 1985)	Credibilidade	Até que ponto o investigador deu voz às diferentes construções da realidade encontradas nos seus dados? A credibilidade é avaliada por aqueles que foram estudados.	"Engajamento prolongado" (p. 301); "observação persistente" (p. 304); triangulação (por exemplo, diferentes fontes de dados, métodos, investigadores, etc.); "debriefing entre pares" (p. 308); "análise negativa de caso" (p. 309); "adequação referencial" (p. 313); "verificações de membros" (p. 314) Fornecer
	Transferibilidade	Existe semelhança contextual entre o contexto que se está estudando e outros contextos? O ônus da prova para tal comparação recai mais sobre aqueles que desejam comparar os resultados com outros contextos do que com o investigador original. O	muitos detalhes (por exemplo, descrição detalhada) para "mostrar" e não "contar" ao leitor as descobertas.
	Confiabilidade	investigador levou em consideração "ambos os fatores de instabilidade e os fatores de mudança fenomenal ou induzida pelo projeto"? (p. 299)	Todas as práticas de credibilidade mais "replicação gradual" dentro do conjunto de dados (p. 317) e "auditoria de inquérito" (p. 317)
	Confirmabilidade	Houve um processo para verificando os dados? A confirmabilidade é característica dos dados,	Auditoria de inquérito; triangulação; "diário reflexivo" (p. 319); "trilha de auditoria" (p. 319); "processo de auditoria" (p. 320)

Fonte: Traduzido de Pratt, Kaplan, Whittington (2020)

5.2.2 Flexible pattern matching como estratégia metodológica

- O que é flexible pattern matching

Para o desenvolvimento deste estudo será utilizada a estratégia metodológica *flexible pattern matching* por facilitar o desenvolvimento de novas teorias em paralelo à realização de uma conexão entre as teorias existentes e evidências empíricas coletadas nos estudos qualitativos (BOUNCKEN et al., 2021), Figura 13. Isto é possível pois o *flexible pattern matching* viabiliza a análise e comparação entre padrões teóricos e empíricos na busca de correspondências entre eles, o que favorece a identificação de inconsistências e oportunidades de melhorias que possam ser utilizadas para problematizar e desenvolver novas teorias (ALVESSON; KÄRREMAN, 2007; BOUNCKEN et al., 2021; BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021), além de ajudar a testar ou expandir os limites contextuais das teorias existentes (ROSS; STAW, 1993).

Figura 13: *Flexible pattern matching approach*

Fonte: Traduzido e adaptado de Sinkovics (2018) baseado em Trochim (1989) e Wible e Sedgley (1999)

Desta forma, tal abordagem permite a interação de componentes dedutivos e indutivos, aliando assim o rigor a um elevado nível de flexibilidade, o que contribui para que ela seja adotada por um número crescente de pesquisadores para analisar questões de mudanças tecnológicas e sociais (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021).

Além disso, o *flexible pattern matching* possui também algumas vantagens significativas para sua utilização em estudos qualitativos (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021), tais como: (i) fortalece a validade dos estudos de casos realizados; (ii) contribui para a resolução de problemas provenientes da utilização de variadas fontes de dados; (iii) contribui para o processo de análise e explicação de fenômenos complexos em estudos qualitativos e (iv) pode gerar *insights* em estudos de casos únicos que contribuam para prever potenciais mudanças futuras. Tais vantagens refletem no aumento do número de estudos qualitativos que utilizam esta estratégia ainda em desenvolvimento (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021), como por exemplo: Gatignon e

Capron (2020); Matthews et al. (2018), Sinkovics et al (2019); Sinkovics, Sinkovics e Yamina (2014).

- *Como utilizar o flexible pattern matching*

A utilização do *flexible pattern matching* como estratégia metodológica deve ter como base dois componentes cruciais, retratados por Bouncken, Qui e García (2021): os padrões teóricos pré-existentes e padrões práticos observados. Entende-se como “padrão” o arranjo de objetos ou entidades que não são aleatórios e descritíveis (TROCHIM, 1989).

Os padrões/construções/modelos iniciais são deduzidos a partir de conhecimento teórico pré-existente antes que sejam coletados os dados empíricos (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021; SINKOVICS et al., 2019). Estes podem advir de uma revisão de literatura sistemática ou semi-sistemática (BOUNCKEN et al., 2021). A definição dos padrões teóricos deve seguir claramente o foco da pesquisa, de forma que seja realizada uma revisão de literatura aprofundada na temática em questão. Estes aspectos são essenciais para a formulação de padrões bem estruturados e na quantidade adequada (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021).

Já a definição dos padrões empíricos deve ser feita com base nos casos/objetos selecionados. Estes devem ser utilizados para examinar, testar ou ampliar os aspectos envolvidos nos padrões teóricos estabelecidos, sendo que o número de casos selecionados depende da natureza e acessibilidade do(s) caso(s) e sua conexão com o desenvolvimento da pesquisa (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021). Além disso, sugere-se que a coleta de dados seja realizada de forma sobreposta com a análise destes, sendo tal abordagem chamada de comparação constante entre os dados coletados (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021; EISENHARDT; GRAEBNER, 2007).

Por fim, tendo em mãos os padrões teóricos e empíricos, o próximo passo consiste na comparação entre eles. Espera-se que descobertas emergentes surjam com base em desencontros entre estes padrões (BOUNCKEN et al., 2021; SINKOVICS et al., 2019) ou pelo surgimento de padrões inesperados (BOUNCKEN et al., 2021). Estas correspondências e desencontros entre os padrões teóricos e observados, como assim como o surgimento de padrões inesperados, fornecem ao pesquisador uma

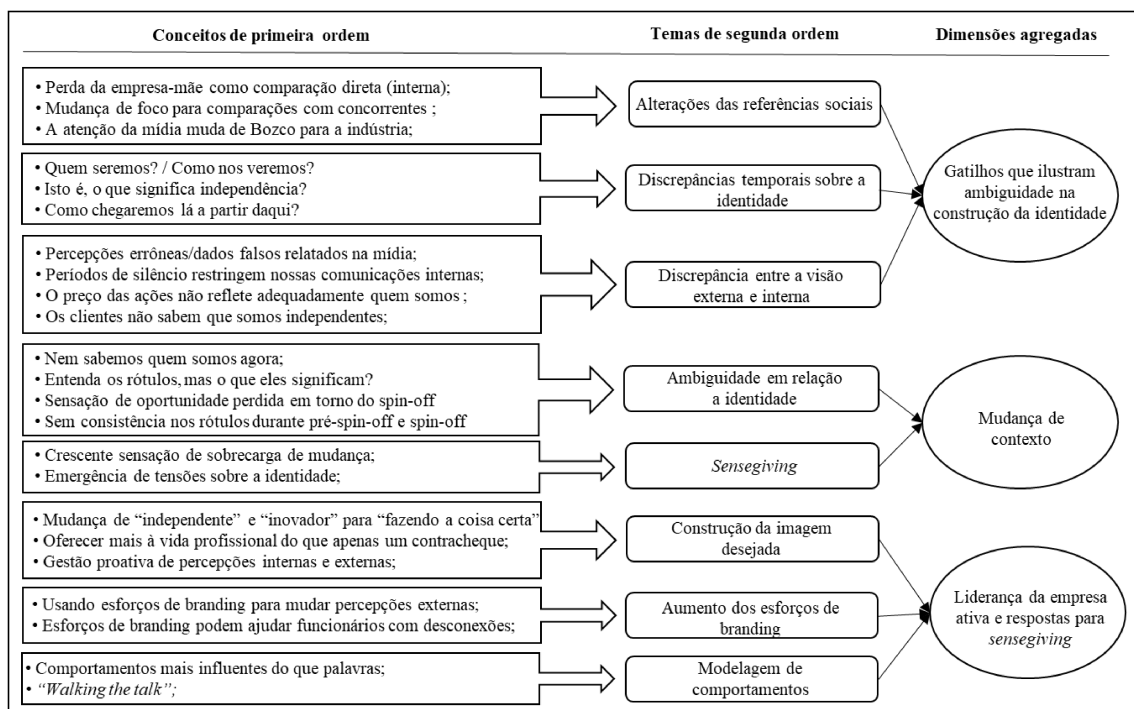
estrutura para teorizar sobre os achados (BOUNCKEN et al., 2021). Mesmo que, inicialmente, uma incompatibilidade entre os dois conjuntos de padrões possa parecer um “problema”, na verdade, representa uma “oportunidade” para revisar ou estender a teoria existente ou iniciar o processo de teorização em direção a uma nova teoria (BOUNCKEN et al., 2021).

Várias maneiras podem ser adotadas para apresentar a comparação e correspondências entre estas bases de dados, tais como: análise de *template*, tabelas, matrizes, figuras e narrativas (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021). No entanto, é crucial lembrar que a fundação para a elaboração teórica e/ou o desenvolvimento de teorias que explicam fenômenos complexos surge a partir das discrepâncias entre os padrões teóricos estabelecidos e os padrões observados na realidade. Essas diferenças demandam uma análise cuidadosa e uma compreensão profunda por parte do pesquisador (BOUNCKEN et al., 2021).

- *Utilização do flexible pattern matching combinada com outro método para a estruturação dos padrões empíricos*

A combinação do flexible pattern matching com a estruturação de dados presente no método de Gioia (Figura 14) é uma estratégia sugerida por Bouncken, Qui e García (2021), pois contribui para o estudo em profundidade dos dados empíricos, a partir da construção de uma “estrutura de dados” hierárquica (GIOIA; CORLEY; HAMILTON, 2013; LANGLEY; ABDALLAH, 2011).

Figura 14: Estruturação de dados em três níveis



Fonte: Traduzido de Corley e Gioia (2004)

Esta forma de estruturar os dados adotada por Gioia, Corley e Hamilton (2013) utiliza três níveis. O primeiro nível é relativo às codificações realizadas (utilizando dos termos utilizados pelo informante), o segundo nível faz uma correspondência entre estas codificações e temas que elas representam. Por fim, os temas são agrupados em forma de dimensões. Elas tem como objetivo demonstrar a relação dinâmica entre conceitos emergentes que descrevem ou explicam o fenômeno de interesse (GIOIA; CORLEY; HAMILTON, 2013) e contribuem para suprir uma preocupação usual no respaldo da qualidade da pesquisa qualitativa: mostrar “como” os dados coletados se relacionam com a teoria que está sendo construída.

Tal estruturação de dados é comumente utilizada em estudos que têm como base a *Grounded Theory* (GLASER; STRAUSS, 1967), abordagem frequentemente citada na literatura para afirmar a validade metodológica em estudos qualitativos de construção de teoria com base em dados brutos (CORBIN; STRAUSS, 2019; SATO, 2019). Esta abordagem também é utilizada por Kidd (2008), Quadro 8, que adota um procedimento de estruturação e agrupamento de dados similar ao de Gioia, Corley e Hamilton (2013).

Quadro 8: Exemplo de estrutura de dados e abordagem para controle de qualidade

Experiências positivas de carreira		
Categoria de ordem superior /	Categoria de ordem inferior ¹	Exemplo
Transições de carreira	Mudou para uma nova função ou padrão de carreira propício, com ou sem promoção (60)	Foi-me oferecido um emprego... que se ajusta perfeitamente às minhas aspirações e desejos sobre com quem trabalho, que trabalho faço e a forma como posso realizá-lo. (M89)
Relações interpessoais	Recebeu reconhecimento ou feedback de outras pessoas (18)	O chefe de RH me pediu para pensar em me tornar um parceiro de negócios. (F50)
	Recebeu apoio de outras pessoas (10)	Fui recebido e confortável em meu novo ambiente. (F37)
Relacionamento com a organização	Autonomia (19)	Eu estava em grande parte no controle do meu próprio tempo e maneira de operar. (M70)
	Poder (8)	Fui ouvido e pude tomar decisões. Acho que tinha muito poder. (F26)
Desenvolvimento no trabalho	Foi eficaz na função (17)	Foram muitas lutas, mas muitas conquistas. (M63)
Sentido de propósito	Tomar uma decisão ou ter pensamentos positivos sobre o futuro (14)	Resolvi procurar um novo emprego e encontrei um anúncio que realmente me chamou a atenção... A ideia de mudança me revigorou. (M27)
Aprendendo e desenvolvendo	Habilidades desenvolvidas por meio de um programa de estudo ou treinamento (5)	Transferi o aprendizado que adquiri na (universidade) para o meu trabalho. (F12)
	Vi perspectiva de aprender novas habilidades ou obter uma qualificação (2)	Eu havia encontrado uma maneira de pagar as aulas noturnas. Fiquei muito entusiasmado por me formar em enfermagem. (F17)
Questões de vida profissional	Equilíbrio no trabalho e na vida doméstica (2)	Minha vida de alguma forma parecia mais integrada. (M1)

¹A porcentagem de participantes que relataram é dada entre parênteses.

Fonte: Traduzido de Kidd (2008)

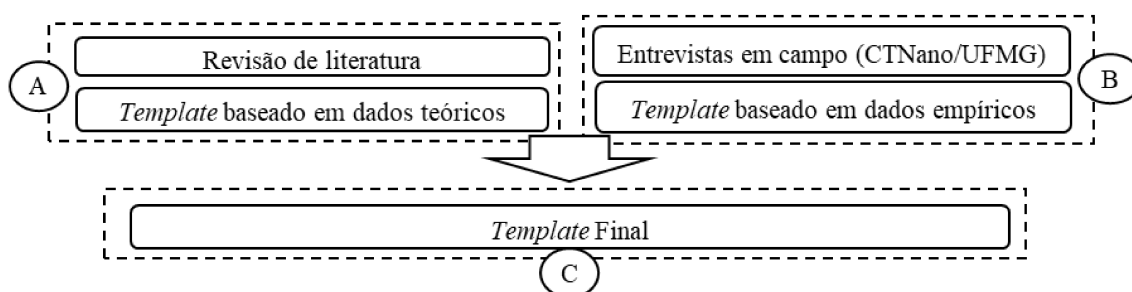
5.3 Condução do estudo

O estudo conta com dados reais de projetos de NT a partir dos quais, em confronto com complexidades potenciais previamente identificadas na literatura, busca-se chegar a um *template* de análise, com o propósito de suportar abordagens de gestão. Conforme dito anteriormente, o ambiente de campo escolhido foi o CTNano/UFMG, cujo foco é o desenvolvimento tecnológico de produtos, processos e serviços envolvendo nanomateriais, a partir de projetos de PD&I com parceiros da indústria.

O *flexible pattern matching* é adotado como estratégia metodológica por facilitar o desenvolvimento de novas teorias em paralelo à realização de uma conexão entre as

teorias existentes e evidências empíricas coletadas nos estudos qualitativos (BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021), sendo uma abordagem intermediária entre dedução e indução. A utilização de tal abordagem foi estruturada em três grandes blocos A, B e C (ver Figura 15), que serão explicados nos próximos subtópicos.

Figura 15: Estruturação do *flexible pattern matching* para a condução do estudo em blocos



Fonte: A autora (2023).

5.3.1 Bloco A - Padrão teórico

O primeiro bloco, Bloco A, consiste no bloco do padrão teórico. Este tem como base uma revisão das literaturas NT e CP. O principal objetivo de estudar a literatura NT foi codificar potenciais complexidades existentes na realização de projetos de desenvolvimentos tecnológicos e de produtos nesta área. Para tal, a busca baseou-se em três principais diretrizes: (i) compreender o porquê a NT é vista como uma área da ciência singular com potencial revolucionário e capaz de gerar inovações tão disruptivas nos mais diversos setores; (ii) investigar se o volume de recursos investidos no desenvolvimento de tecnologias e produtos nesta área corroboram o interesse dos mais diversos atores em seu progresso e (iii) mapear as particularidades dos desenvolvimentos em NT e (iv) identificar qual(is) estratégias são convencionalmente utilizadas para avaliar projetos nesta área. Esta teve como resultado central o Quadro 2, que sintetiza as características dos desenvolvimentos em NT.

Já em relação a literatura de CP, o objetivo inicial consistiu em compreender o que é a CP, os vieses dos estudos desta área, seguido pelo mapeamento das dimensões de complexidade documentadas na literatura existente. Posteriormente, após a obtenção de uma compreensão abrangente da natureza da CP e de suas múltiplas

facetas, procedeu-se à identificação das fontes de complexidade e das formas pelas quais ela se manifesta em projetos diversos, o que resultou no Quadro 6.

Dada a evidente sinergia entre as literaturas — uma vez que a literatura sobre CP identifica múltiplos aspectos que podem ser potencialmente considerados como complexidades nos desenvolvimentos em NTs — foi elaborado um *template* contendo diversos "elementos de CP", termo que passará a ser adotado para denotar os *outputs* resultantes das codificações realizadas nesta tese. Portanto, este *template* derivado da identificação de elementos de complexidade presentes nas literaturas de NT e CP, constitui o resultado do Bloco A.

Durante a elaboração deste *template* baseado em dados teóricos foi utilizada a estratégia de identificação e agrupamento, em um só elemento, de elementos de complexidade aparentemente muito similares. Ou seja, aqueles que compartilhavam um significado ou característica comum passaram a constituir um mesmo grupo, conforme proposto por Strauss e Corbin (1998). Para tal, foi seguida também a orientação de King e Books (2017) de organizá-los em agrupamentos significativos e começar a se pensar em como os temas se relacionam entre si. Neste sentido, foram exploradas diferentes maneiras de organização, sempre de forma reflexiva sobre qual seria o melhor agrupamento passível de ser feito neste momento.

O agrupamento considerado como mais promissor foi o que utilizou como referência inicial a proposta de San Cristóban et al. (2018), abordada na revisão bibliográfica da presente tese (Quadro 5).

5.3.2 Bloco B – Padrão empírico

O resultado deste bloco foi um *template* construído com base na identificação e análise de elementos de complexidade coletados em campo, por meio de entrevistas abertas com pesquisadores do CTNano/UFMG. Com o objetivo de explicar melhor diferentes aspectos da realização das entrevistas, este tópico está dividido em cinco seções: (i) caracterização dos entrevistados; (ii) caracterização dos projetos; (iii) preparação das entrevistas; (iv) condução das entrevistas e (v) análise dos dados obtidos nas entrevistas.

- *Caracterização dos entrevistados*

Foram realizadas entrevistas abertas com sete pesquisadores seniores vinculados ao CTNano/UFMG. Estes consideraram o momento em que atuavam como lideranças em projetos de PD&I entre U-E em NT na área de ciência dos materiais, executados pelo Centro. Entende-se como pesquisadores seniores aqueles que possuem pelo menos 5 anos de experiência em projetos de PD&I e que ocuparam ou ocupam o cargo de supervisão ou coordenação desses projetos. Estes pesquisadores possuem o título de doutor ou estão cursando o doutorado, e possuem *background* nas áreas de física, química ou engenharias. Por questões de confidencialidade, os pesquisadores foram identificados como Pesq.1-7 no Quadro 9.

Quadro 9: Entrevistados no CTNano/UFMG

Pequi- sador	Cargo no CTNano/UFMG		Formação acadêmica		Background		
	Coordenador	Supervisor	Doutorando	Doutor	Físic a	Química	Enge- nharia
Pesq. 1	x			x		x	
Pesq. 2		x		x			x
Pesq. 3		x		x	x		x
Pesq. 4		x	x				x
Pesq. 5	x			x	x		
Pesq. 6		x		x	x		
Pesq. 7		x		x	x		x

Fonte: A autora (2023)

- *Caracterização dos projetos*

A realização de cada entrevista teve como base a reflexão do entrevistado em relação a um projeto específico, com o objetivo de identificar os elementos de complexidade que se fizeram presentes neste projeto, segundo a visão do entrevistado. Para tal, foram identificados 14 projetos de PD&I, todos voltados para a aplicação de nanomateriais na indústria em setores como petróleo e gás, mineração, refratários, papel e celulose, metal mecânico e aviação. Seis projetos já haviam sido concluídos, enquanto a oito ainda estavam em andamento.

Todos os projetos selecionados tinham, pelo menos, um ano de duração. Vale ressaltar que isto não consiste na duração do desenvolvimento da tecnologia ou do produto que se almeja obter pois, para que o desenvolvimento de uma tecnologia e/ou

produto que esteja passível de ser comercializado no mercado, é demandado um período superior a um ano. O que demanda a realização de diversos projetos (cada qual envolvendo o aumento da maturidade da tecnologia de um TRL para outro superior).

O tempo despendido para a captação de cada um destes projetos é variável, mas superior a um ano. Entende-se como tempo de captação o momento a partir do qual se dá início a discussão da possibilidade de execução de um projeto com determinado objetivo finalístico, até o desembolso da primeira parcela pela empresa parceira.

Ainda, os projetos selecionados estavam sendo executados nos últimos cinco anos, ou seja, são projetos relativamente recentes considerando os 13 anos de existência do CTNano/UFMG e o tempo previsto para a chegada de uma NT na área de ciência dos materiais no mercado.

Por fim, vale ressaltar que alguns dos 14 projetos possuem em comum o pesquisador entrevistado neste estudo. Os entrevistados participaram, em sua maior parte, tanto na etapa de prospecção quanto na de execução do projeto sobre o qual emitiram sua opinião na entrevista. O Quadro 10 apresenta uma síntese dessas informações ao destacar o *status* de cada um dos projetos, o pesquisador que foi entrevistado e o setor da empresa parceira responsável pelo financiamento do desenvolvimento tecnológico. Por questões de confidencialidade, os projetos foram identificados como Proj.1-14 no Quadro 10.

Quadro 10: Características dos projetos e entrevistados

Projeto	Status		Pesquisador entrevistado	Setores					
	Em andamento	Concluído		Petróleo e Gás	Mineração	Papel e Celulose	Metal Mecânico	Refratário	Aviação
Proj. 1	x		Pesq.1	x					
Proj. 2	x		Pesq.1	x					
Proj. 3	x		Pesq. 2		x				
Proj. 4		x	Pesq.3	x					
Proj. 5	x		Pesq.3				x		
Proj. 6	x		Pesq.3				x		
Proj. 7		x	Pesq. 4					x	
Proj. 8	x		Pesq. 4	x					
Proj. 9		x	Pesq.5	x					
Proj. 10		x	Pesq.5					x	
Proj. 11		x	Pesq. 6			x			
Proj. 12	x		Pesq. 6		x				
Proj. 13	x		Pesq. 7						x
Proj. 14		x	Pesq. 7		x				

Fonte: A autora (2023)

- *Preparação das entrevistas*

Antes da realização de cada entrevista foi feito um levantamento inicial de informações sobre cada entrevistado (utilizando como base o *curriculum* de cada um deles na plataforma lattes) e do projeto a ser analisado. Este levantamento de informações foi compilado no modelo de protocolo de entrevistas adotado para as entrevistas realizadas.

Em relação a cada entrevistado foram levantadas as seguintes informações: (i) nome completo, (ii) nível de formação (doutor ou doutorando), (iii) *background* (química, física, engenharias), (iv) quantos anos atua em projetos de pesquisa e desenvolvimento (não necessariamente com projetos de PD&I em NT envolvendo relação U-E), (v) há quantos anos está no CTNano/UFMG, (vi) quantidade de projetos do CTNano/UFMG em que já assumiu posição de supervisão e/ou coordenação, (vii) posição que ocupa no projeto que será analisado na entrevista (supervisor ou coordenador).

No que diz respeito às informações relacionadas ao projeto sobre o qual o entrevistado compartilhará suas percepções, este projeto foi identificado através do seu título, duração, semestre em que teve sua execução iniciada e *status* (em execução ou finalizado). Um exemplo do protocolo de entrevistas com estes campos devidamente preenchidos pode ser visto na Figura 16.

Figura 16: Protocolo de Entrevistas - Preparação da Entrevista

PROTOCOLO DE ENTREVISTAS			
PREPARAÇÃO DA ENTREVISTA	Caracterização do Pesquisador/Entrevistado:		
	Nome completo:	[REDACTED]	
	Formação:	(x) Doutor () Doutorando	
	Curso de formação:	Física	
	Anos de atuação em projetos de P&D&I:	7 anos	
	Anos de atuação no CTNano/UFMG:	7 anos	
	Qtde de projetos que supervisionou ou coordenou:	4	
	Posição no projeto em análise:	Supervisor	
	Caracterização do projeto analisado:		
	Título do projeto:	[REDACTED]	
Duração do projeto:	2 anos	Semestre de início: 2018/2	Status atual: Finalizado

Fonte: A autora (2023)

- *Condução das entrevistas*

O entrevistador inicia a entrevista contextualizando o pesquisador entrevistado em relação ao objetivo da mesma e objeto da presente tese e, pergunta a ele se a entrevista pode ser gravada. Em seguida, valida as informações que foram levantadas por ele durante a preparação da entrevista (vide exemplo da Figura 16). O entrevistador orienta o entrevistado a responder as perguntas que lhe forem apresentadas considerando a análise de um projeto específico, sinalizado pelo entrevistador.

A primeira pergunta da entrevista é: “Quais complexidades você considera que estiveram presentes no Projeto X?”. O entrevistador apresenta o conceito de complexidade adotado pelo presente estudo, e que deve ser utilizado como base para a resposta do entrevistado: “Dificuldades enfrentadas na execução do projeto”.

O objetivo de fazer tal pergunta de forma aberta, sem ter apresentado previamente nenhum dos elementos de complexidade que foram mapeados na literatura, é evitar que o pesquisador entrevistado viesasse sua percepção sobre o que deve ser considerado como complexidade para aquele projeto, sendo então esperada uma sinalização espontânea por parte dele.

Ainda, para cada complexidade sinalizada, o entrevistador questiona se ela se manifestou na etapa de prospecção e/ou de execução do projeto. Adicionalmente, também foi solicitado ao entrevistado que a avaliasse em termos de seu impacto percebido (baixo, médio, alto), fornecendo ao entrevistador explicações de como se deu este impacto. A solicitação de tais informações adicionais teve como objetivo estimular o entrevistado a fornecer mais informações sobre cada uma das complexidades sinalizadas por ele, contribuindo assim para uma maior reflexão por parte do entrevistado e uma compreensão mais profunda por parte do entrevistador.

- *Análise inicial dos dados obtidos nas entrevistas*

As entrevistas tiveram uma duração variável, entre 30 e 55 minutos. À medida que eram conduzidas, as gravações foram encaminhadas a dois pesquisadores externos designados como Codificadores Independentes (CIs). A utilização de CIs teve como motivação principal garantir o rigor científico desta pesquisa qualitativa, apoiada na

abordagem Lincoln e Guba (1985) e em sinergia Morse *et. al* (2002). Optou-se por utilizá-los na realização das codificações, em detrimento a abordagens de inteligência artificial, principalmente devido a necessidade de sensibilidade contextual neste processo. Segundo Lincon e Guba (1985) há aspectos que respaldam a "*trustworthiness*" na pesquisa qualitativa, sendo a atuação dos CIs um dos meios utilizados para garanti-la neste estudo.

Isto porque cada CI ficou responsável por analisar separadamente cada entrevista visando codificá-la e estruturar/agrupar os dados coletados em uma lógica de *Grounded Theory*. A Figura 14 ilustra esta estrutura a partir de um exemplo presente no artigo de Corley e Gioia (2004). Este tipo de estrutura também foi utilizada em Kidd (2008) e analisada por Gioia, Corley e Hamilton (2013). Segundo Gioia, Corley e Hamilton (2013) esta forma de estruturar os dados é ordenada de acordo com categorias hierárquicas – termos utilizados pelo próprio entrevistado ou frases que retratam o conteúdo exposto, temas e dimensões –, o que representa por si só um pressuposto teórico de que a experiência fenomenológica pode ser representada como uma estrutura categórica.

Conforme dito anteriormente, e tendo como referência a Figura 14, a estruturação e análise dos dados começa com a identificação de conceitos iniciais, descritos a partir da fala do entrevistado. Em seguida, é realizada uma codificação axial, na qual são procuradas relações entre estes conceitos, o que resulta em temas de segunda ordem. Finalmente, temas semelhantes são agrupados em dimensões que passam a constituir o *template* (CORLEY; GIOIA, 2004).

Inicialmente, isto foi feito separadamente por cada CI, sendo que, em seguida, os dois CIs se reuniam com o objetivo de comparar e discutir as codificações realizadas naquela entrevista para que, juntos, chegassem em um consenso sobre a codificação final de cada entrevista. Como resultado, obteve-se um *template* que era constantemente refinado à luz das entrevistas seguintes, que passam pelo mesmo processo. A última versão deste *template* consiste no resultado do Bloco B, pois contempla os elementos de complexidade identificados a partir de dados empíricos.

5.3.3 Bloco C – *Template final*

O terceiro bloco é o C, chamado de *Template final*. Tendo em mãos os dois *templates* originados dos blocos anteriores deste estudo, o *template* resultante dos dados empíricos foi confrontado com aquele produzido estritamente com base nas literaturas de NT e CP. Esta comparação, como proposta pela abordagem *flexible pattern matching*, objetiva testar e/ou desafiar os padrões teóricos e teorias existentes com evidências empíricas. Desta forma, espera-se que as correspondências e associações geradas contribuam para testar e expandir os limites da teoria de CP e, ao mesmo tempo, seja um instrumento norteador de análise e exploração das complexidades mais significativas em projetos dessa natureza.

5.3.4 Controle de qualidade

Conforme dito no Tópico 5.2.1 – Pesquisa qualitativa: confiabilidade e validade, o presente estudo possui grande preocupação em garantir a credibilidade dos resultados que serão alcançados. Sendo assim, foram estudadas, escolhidas e adotadas preliminarmente algumas estratégias para garanti-la. Os direcionamentos para a definição de quais cuidados deveriam ser tomados durante a realização da presente pesquisa foram obtidos dos estudos de Lincoln e Guba (1985), mais especificamente os quatro aspectos que respaldam "*trustworthiness*" na pesquisa qualitativa, indicados no Quadro 7.

Pratt, Kaplan, Whittington (2020) fizeram uma tabela-síntese (Tabela 1) que auxiliou na definição das estratégias que poderiam ser adotadas para garantir a qualidade da pesquisa de acordo com cada um dos critérios de Lincon e Guba (1985). Ante ao exposto, este tópico está estruturado de forma a apresentar quais foram as estratégias de controle de qualidade que foram adotadas de acordo com cada um dos critérios de Lincon e Guba (1985).

- *Credibilidade*

Conforme citado na tabela-síntese apresentada por Pratt, Kaplan, Whittington (2020), a credibilidade do estudo pode ser obtida a partir, por exemplo, do momento em que o pesquisador passa a considerar diferentes fontes de dados para embasar e corroborar as conclusões obtidas.

No contexto desta tese, a estratégia para assegurar a credibilidade da pesquisa é evidenciada pela incorporação de diversas fontes de dados relacionados ao fenômeno em estudo. Essas fontes abrangem não apenas informações provenientes da literatura especializada em NT e CP, mas também dados oriundos de 7 pesquisadores experientes e 14 projetos de PD&I na área de NT e ciência dos materiais.

- *Transferibilidade*

Segundo Pratt, Kaplan, Whittington (2020) o grau de transparência de uma pesquisa não é determinado pelas demandas de replicação, mas sim pelo grau em que os autores conseguem convencer o leitor de que foram honestos na forma como suas pesquisas foram realizadas e razoáveis nas conclusões. Ainda, eles ressaltam também que a capacidade de replicação é apenas uma razão para ser transparente, ou seja, ela é apenas uma das diversas formas de estabelecer confiabilidade na pesquisa qualitativa.

Considerando que os autores supracitados tratam “replicação” de forma muito convergente com o conceito de “transferibilidade” adotado Lincon e Guba (1985), esta tese parte do pressuposto de que quanto mais detalhado for o passo a passo da condução deste estudo, maior será a capacidade dele ser utilizado em outros contextos, por outros pesquisadores que tomem os cuidados adequados para considerar as peculiaridades que estarão presentes nesses outros ambientes. Sendo assim, será citado um exemplo que pode ser utilizado como referência para respaldar o potencial de replicação de tal estudo.

Projetos de PD&I em NT na área de ciência dos materiais desenvolvidos entre U-E são comuns em contextos que não envolvam a execução dentro de um centro de tecnologia vinculado a uma universidade pública federal, tal como é o CTNano/UFMG. Tal fato pode ser ilustrado a partir da demonstração de alguns editais mostrados no Tópico 2.2, que são abrangentes para diversos outros atores do ecossistema de empreendedorismo e inovação, tal como empresas e grupos de pesquisa universitários.

Para o desenvolvimento de um projeto de NT, estes grupos de pesquisa universitários (seja de universidades públicas ou privadas), mesmo sem contar com toda a robusta infraestrutura presente em um centro de tecnologia (e com acesso facilitado), também

têm potencial de desenvolver tais projetos (seja a partir de parcerias e/ou colaborações com outros grupos e/ou infra estruturas auxiliares, dentre outras diversas possibilidades). Caso contrário, os próprios editais seriam direcionados a especificamente centros de tecnologia em nanomateriais, o que não é o que ocorre na atual situação.

Ou seja, diversas complexidades identificadas neste estudo, poderão também ser a fonte de desafios identificados em projetos de NT desenvolvidos por outros grupos de pesquisa, inseridos em contextos distintos do estudado, o que dá abertura para que o presente estudo tenha potencial para ser ampliado para uma maior amostragem.

- *Dependabilidade*

Segundo Lewis (2009), uma auditoria é estabelecida por pesquisadores que documentam o processo de investigação por meio de registro no diário e memorandos, mantendo um registro de pesquisa de todas as atividades, desenvolvendo uma cronologia de coleta de dados e registrando claramente os procedimentos de análise de dados.

Considerando tal colocação, o presente estudo conta com uma base de dados de mais de 200 artigos sobre a temática CP e NT. Estes estão devidamente organizados no software Mendeley e parte deles está contemplada também nas referências bibliográficas desta tese. No que tange aos aspectos metodológicos pelo menos 35 artigos foram estudados, estes também estão localizados no software Mendeley e parte deles está contemplada também nas referências bibliográficas desta tese.

Diante disso, este conteúdo pode ser, a qualquer momento, consultado e compartilhado para que sejam checadas dúvidas que possam surgir sobre a base de dados inicial e os fundamentos metodológicos de condução do estudo.

Por fim, as entrevistas realizadas com os pesquisadores foram gravadas para que pudessem ser utilizadas pelos CIs e analisadas pela autora da presente tese quantas vezes fosse necessário.

- *Confirmabilidade*

Além das estratégias já sinalizadas acima que podem também ser vistas como formas de garantir a confirmabilidade dos resultados advindos do presente estudo, há também outras que merecem ser destacadas. A primeira delas consiste no fato de que os dados coletados na literatura foram confrontados com dados de campo obtidos a partir de pesquisadores experientes na área, com o objetivo de obter uma validação se estes realmente estão presentes na prática nos projetos estudados. Isso contribuiu fortemente para minimizar as chances de se ter algum viés, motivação ou interesse específico da pesquisadora autora do presente estudo.

A pergunta central feita aos entrevistados é uma pergunta aberta. O único direcionamento fornecido a eles é o conceito simplificado de elemento de complexidade adotado no presente estudo. Isto visa garantir que o entrevistado não seja influenciado por nenhum resultado da busca e análise feita na literatura sobre elementos de complexidade. Tal estratégia também respalda a preocupação em manter a neutralidade na condução do estudo.

Ademais, há também a utilização de dois CIs para a codificação das respostas à questão aberta fornecida por cada entrevistado. Cada codificador além de fazer sua própria codificação, é confrontado com interpretação do outro e teve que passar por um período de discussão e convergência para a elaboração de um *template* resultante desta conversa.

Por fim, a solicitação de uma explicação do entrevistado (mesmo que de forma breve), sobre como se deu a influência de determinado elemento de complexidade no projeto em análise, contribuiu para que a pesquisadora autora da presente tese questionasse constantemente as premissas e definições pré-estabelecidas durante a revisão de literatura. Ou seja, tal questionamento contribuiu para o desenvolvimento de uma interpretação dos dados o mais credível possível.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Apresentação dos resultados

Os resultados deste estudo serão descritos de acordo com cada um dos blocos: Padrão/template teórico (Bloco A), Padrão/template empírico (Bloco B) e *Template* final (Bloco C).

No que tange ao Bloco A, *template* dos elementos de complexidade baseado em informações advindas das literaturas de NT e CP, este é composto por 54 micro-elementos de complexidade e sete 10 dimensões/macro-elementos (tamanho, interações e interdependências, tecnologia, *stakeholders*, divisão do trabalho, objetivos e metas propostas, gestão do projeto, globalização e contexto, fluxo do desenvolvimento e mercado e negócio). O Quadro 11 traz um recorte deste *template*, que aborda alguns elementos de complexidade identificados em três das 10 dimensões/macro-elementos. O *template* completo, que inclui os autores que podem ser associados a cada um dos elementos de complexidade identificados, está presente no APÊNDICE 2.

Quadro 11: Recorte do template teórico (Bloco A)

ELEMENTOS DE COMPLEXIDADE	
MACRO	MICRO
Tamanho	É demandado muito tempo de desenvolvimento para chegar ao mercado (10-15 anos)
	Necessidade de muito recurso financeiro ao longo do desenvolvimento
	Necessidade de alianças para co-desenvolvimento
	Muitos elementos técnicos envolvidos no desenvolvimento
Interação e interdependência	Muita interação e interdependência entre as variáveis técnicas que influenciam no desenvolvimento
	Interação e interdependência entre as pessoas e instituições envolvidas no co-desenvolvimento
Tecnologia	Dificuldades e incertezas atreladas a viabilidade do scale-up
	Muitas variáveis para controlar no scale-up
	Acesso a equipamentos de caracterização adequados

Fonte: A autora (2023)

O *template* resultante do Bloco B, desenvolvido pelos CIs, apresenta os elementos de complexidade identificados a partir de dados empíricos. Este contempla 58 micro-elementos de complexidade (alguns deles estão sinalizados no Quadro 12 como “Complexidade identificada pelos CIs”). Os micro-elementos foram agregados em 13

macro-elementos (alguns deles estão sinalizados no Quadro 12 como “Dimensão agregada definida pelos CIs”), também chamados de dimensões agregadas devido a utilização da estrutura de agrupamento de dados baseada nos artigos de Corley e Gioia (2004), Gioia, Corley e Hamilton (2013) e Kidd (2008).

A identificação destas complexidades foi feita a partir da codificação de 117 recortes literais das entrevistas que apontaram com maior ou menor clareza para elementos associados à complexidade. Um recorte deste *template*, com alguns exemplos de complexidades identificadas para as dimensões “complexidade tecnológica” e “complexidade na gestão do conhecimento”, pode ser visto no Quadro 12. A versão completa do *template* originado pelos CIs está contemplada no APÊNDICE 3.

Quadro 12: Recorte do template empírico (Bloco B)

Fala literal do entrevistado que remete a uma complexidade identificada no projeto	Complexidade identificada pelos CIs	Dimensão agregada definida pelos CIs
“A parte mais complexa é fazer a proposta técnica de algo que não conhecíamos direito.”	<i>Know-how</i> para o escrever uma proposta de projeto.	Complexidade tecnológica
“Esse material deu origem depois a uma complexidade extra que a gente não havia previsto no início do projeto. E foi a complexidade de uma vez que já tinha esses materiais em mãos, fazer as caracterizações que a gente queria fazer... Não tínhamos nem equipamento que desse pra fazer isso. Foi muito mais difícil do que a gente imaginou que seria na fase de planejamento.”	Caracterização do material.	
“Outro ponto é o tempo. Eu entendo que o tempo da academia e o tempo da indústria são coisas diferentes. Mas normalmente a gente precisa de mais tempo pra poder fundamentar cada vez mais.”	Desenvolvimento de <i>know-how</i> para executar o projeto.	
“Os relacionamentos têm sido bastante complexos também. Até por essa questão, a barreira tecnológica é tão grande que os conflitos acontecem por	Desafios técnicos influenciam na	

ausência de competência para executá-lo.”	gestão de pessoas.	
“Teve falha na hora de caracterizar por parte de gente da frente de caracterização do CT, que tem que atender todo mundo, então não tão comprometidos com ninguém, no final das contas.”	Falhas técnicas da equipe do Centro	
“(…) tínhamos que escalonar e manter a reprodutibilidade do processo, que exige parâmetros bem controlados.”	Reprodutibilidade do processo.	
“Do ponto de vista técnico, foi um projeto desafiador pelo volume de material que a gente teria que entregar pra empresa, que era algo sem precedentes até então. Foram 40 quilos de materiais produzidos!”	Escalabilidade.	
“Acho que essa questão da falta de um histórico do que já foi desenvolvido pelo Centro e pode ser utilizado por outros grupos, eu acho que é um grande gargalo (...) E dependendo de como que o povo saí, de demissão e tal, eles não querem repassar o histórico.”	Gestão do conhecimento técnico.	Complexidade na gestão do conhecimento.
“Seria bom se tivesse um relatório, ou algo do tipo, do CT Nano de metodologias técnicas do que é realizado dentro do CT, pois existe uma dificuldade de manter os pesquisadores”.	Gestão de conhecimento técnico.	

Fonte: A autora (2023)

A construção do *template* resultante do Bloco C, *template* final, foi feita em quatro etapas: (i) confrontando a versão completa do *template* indicado no Quadro 11 com a versão completa do *template* indicado no Quadro 12; (ii) analisando e atualizando os micro-elementos de complexidade identificados de acordo com as evidências empíricas codificadas; (iii) reavaliando a melhor forma de agrupar os micro-elementos de complexidade em macro-elementos e (iv) descrevendo uma definição para cada macro-elemento que refletisse a análise do quadro teórico à luz das evidências empíricas obtidas.

O resultado deste processo foi o *template final* que possui os elementos de complexidade mais significativos em projetos de PD&I em NT, formado por 56 elementos agrupados em sete categorias (tamanho, interação e interdependência, desafio tecnológico, negócio, globalização e contexto, divisão do trabalho e gestão do projeto).

O Quadro 13 apresenta os macro-elementos de complexidade e suas respectivas definições que fazem parte do *template* resultante do Bloco C. A versão completa do *template* contempla também os micro-elementos de complexidade associados a cada macro-elemento, pode ser visto no Quadro 14.

O Quadro 13 em conjunto com o Quadro 14 formam o *Template* Final, resultado principal do presente estudo (optou-se por retratar as definições dos macro elementos em um quadro separado dos micro elementos de complexidade por uma questão de espaço e tamanho das letras do texto).

Quadro 13: Recorte do template final (Bloco C): macro-elementos de complexidade e suas definições

Macro-elementos	Definição das complexidades associadas a cada macro-elemento
Tamanho	Tamanho está principalmente vinculado à quantidade de elementos que estão envolvidos no projeto. Entende-se elementos como quantidade de instituições e/ou grupos de pesquisa envolvidos, de pessoas executando o projeto, de <i>stakeholders</i> que devem ser geridos, de instâncias nas quais o projeto deve ser aprovado, de potenciais mercados, de recursos financeiros e duração do projeto.
Interação e interdependência	Interação e interdependência estão associados à variedade de elementos presentes e interações/interdependências existentes/demandas entre eles.
Desafio tecnológico	A complexidade vinculada ao desafio tecnológico está atrelada ao acesso e retenção de pessoas com o <i>know-how</i> na área para escrever, executar e gerir o projeto. Ter empresas parceiras com experiência prévia em PD&I externo e NT. Conseguir aumentar a escala dos testes e da produção e manter os resultados obtidos, bem como ter fácil acesso e confiabilidade nas caracterizações realizadas.
Negócio	A complexidade do negócio pode ser associada à inexistência de arranjos e interfaces que favoreçam o surgimento de inovações entre empresas que fornecem o produto/ou insumos e aquelas que adquirem/o utilizam.
Globalização e contexto	Globalização e contexto estão associados a eventos externos ao projeto que ocorrem independentemente dele, mas que influenciam seu processo de negociação e execução.
Divisão do trabalho	A divisão do trabalho está associada principalmente às fragmentações dos processos de tramitação do projeto, aquisições e contratações que envolvem burocracias e atividades específicas que demandam a mobilização e aprovação de diferentes pessoas com baixo envolvimento/comprometimento/engajamento com os interesses do projeto.
Gestão do projeto	Gestão do projeto está associada principalmente à gestão do conhecimento técnico e gerencial envolvido na execução do projeto, gestão da infraestrutura, de pessoas com diferentes <i>backgrounds</i> , do entendimento dos parceiros/ <i>stakeholders</i> , do planejamento, escopo e recursos do projeto.

Fonte: A autora (2023)

Quadro 14: Recorte do template final (Bloco C): desdobramento dos macro-elementos de complexidade

Elementos de complexidade		
Macro	Meso	Micro
Tamanho	Duração	Duração do projeto
	Recursos	Volume de recursos envolvidos no projeto
	Stakeholders/instituições	Quantidade de stakeholders e instituições parceiras
		Quantidade de instituições executoras
	Pessoas	Quantidade de pessoas envolvidas na execução técnica
		Quantidade de pessoas envolvidas gestão
		Quantidade de pessoas envolvidas nas aquisições e contratações do projeto
Variáveis técnicas	Quantidade de instâncias/níveis hierárquicos para a obtenção de aprovações	
Interação e interdependência	Tramitações/aprovações do projeto	Grande número de variáveis técnicas influenciam os fenômenos em escala nanométrica
		Dependência de aprovação/tramitação sequencial entre várias instâncias/níveis hierárquicos de uma mesma instituição
	Documentações do projeto	Dependência de aprovação/tramitação sequencial entre várias instâncias/níveis hierárquicos de diferentes instituições
		Negociação do instrumento jurídico considerando os interesses distintos de várias instituições
	Entre diferentes setores da fundação de apoio	Negociação do plano de trabalho considerando os interesses distintos de várias instituições
		Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio para a realização de cada aquisição
		Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio para a realização de contratações de pessoal
	Em relação às atividades sob responsabilidade da empresa parceira	Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio e da empresa parceira para evitar problemas na prestação de contas
		Dependência da empresa parceira para o fornecimento de informações técnicas e materiais de partida para o projeto

		Dependência da empresa parceira para acessar o local onde serão realizados os testes com o material em desenvolvimento no projeto
		Necessidade de entendimento da empresa parceira que o bom andamento do projeto está também atrelado às suas entregas/retornos/mobilizações
		Interdependência entre as atividades do cronograma desempenhadas pela universidade e pela empresa
	Entre a equipe executora do projeto	Necessidade de transferência do conhecimento para novos entrantes
		Retenção de pessoal diante das incertezas em relação a disponibilidade dos recursos financeiros
		Dependência de profissionais técnicos que atendem simultaneamente a demandas de diferentes projetos e não estão focados em um só desenvolvimento
Entre as variáveis técnicas	Muita interdependência e influência de uma variável técnica sobre outra, o que acarreta mudanças significativas no produto	
Entre diferentes projetos/instituições financiadoras do desenvolvimento tecnológico	Necessidade de aporte de recursos contínuo para que o desenvolvimento tecnológico (que envolve que um projeto) caminhe rumo a um produto comercial. A busca por parceiros que não foram os financiadores iniciais da tecnologia gera complexidade adicional.	
Desafio tecnológico	Estrutura da matéria	Forte influência da estrutura da matéria no processo de desenvolvimento de um produto
	Pessoal qualificado e com background na área	Contratação e retenção de pessoal qualificado e com background em desenvolvimentos com nanomateriais
	Know-how (da universidade) na área de nanotecnologia	Know-how para escrever uma proposta de projeto
		Know-how para executar o projeto
		Know-how para captar e gerir o projeto
	Histórico da empresa com PD&I externo e nanotecnologia	Conhecimento/experiência da empresa financiadora sobre projetos de PD&I
		Capacidade de compreensão da empresa que o desenvolvimento tecnológico envolve vários projetos para avançar do TRL 1 ao 9.
		Entendimento da empresa parceira sobre nanotecnologia
Aumento de escala e reprodutibilidade	Desafio de aumentar a escala e manter os resultados/melhorias obtidas em menor escala	

	Caracterização e controle de qualidade	Acesso aos equipamentos de caracterização
		Demora na obtenção dos resultados das caracterizações
		Confiabilidade dos resultados das caracterizações
	Pivotagem	Mudanças no rumo do desenvolvimento não é algo simples e testagem de estratégias alternativas pode ser muito custoso devido ao tempo demandado para os testes, dificuldade de acesso à infraestrutura e pessoal capacitado
Negócio	Deficiência nas interfaces entre os players da cadeia	Arranjo entre os players da cadeia e necessidade de interagir com empresas conhecedoras do mercado para poder direcionar aspectos técnicos do desenvolvimento
		Posição a montante na cadeia de valor
	Inovações complementares	Dependência de inovações complementares para viabilizar a utilização de produtos com nanomateriais (ex: sensores nanoestruturados demandam uma parte eletrônica diferenciada que não é competência técnica do CTNano/UFG)
Globalização e contexto	Globalização	Fragmentação da cadeia de valor
	Contexto	Influência do contexto político
		Presença de instabilidades gerais (ex: desastres ambientais, eventos de pandemia, fusões entre empresas...)
Divisão do trabalho	Divisão do trabalho e tomadores de decisão entre pessoas distintas de uma mesma instituição	Fragmentação das atividades, responsabilidades e aprovações no processo de compra
		Fragmentação das atividades, responsabilidades e aprovações no processo de contratação de pessoal
		Fragmentação das atividades de análise e aprovação do projeto entre instâncias de uma mesma instituição
		Atividades sem prazo limite e sem prejuízos para os envolvidos caso sua execução se dê de forma deficiente
	Divisão do trabalho e tomadores de decisão entre instituições diferentes que compõem o projeto	Dificuldade de convergir negociações com várias instituições que possuem interesses, nível de envolvimento e comprometimento distintos
		Tramitações sem prazo limite e sem prejuízos para parte dos envolvidos caso sua execução se dê de forma deficiente
		Burocracias e tramitações específicas para cada instituição envolvida
		Contratação de serviços de terceiros que não estão igualmente comprometidos com o projeto
		Compartilhar conhecimentos sensíveis entre empresas que conhecem o mercado

Gestão do projeto	Ferramentas gerenciais utilizadas	Gestão do conhecimento
	Riscos e criticidades mapeadas	Complexidade na retenção de pessoal qualificado/background (turnover)
		Manter a infraestrutura operacional
		Entendimento e nível de engajamento da empresa parceira com o projeto
		Planejamento do projeto considerando diferentes cenários
		Compatibilidade entre escopo e orçamento disponível e negociações envolvendo diferentes interesses
		Compatibilidade entre escopo e duração prevista
		Conflitos de interesse na alocação dos recursos financeiros do projeto
		Gestão de pessoas com backgrounds e experiências distintas

Fonte: A autora (2023)

6.2 Discussão e análise do *template* final

Para facilitar a leitura deste tópico os macroelementos e microelementos de complexidade serão identificados ao longo do texto em *itálico*.

6.2.1 *Exemplos de convergências e complementaridades entre complexidades identificadas na literatura e no ambiente de campo*

A formulação do *template* final foi um esforço de modelagem que, ao longo das entrevistas, confirmou a presença de múltiplos aspectos mencionados pela literatura como fatores que contribuem para o aumento da complexidade no dia a dia de projetos de PD&I em NT. Neste subtópico serão ilustrados alguns exemplos de convergências e complementaridades entre os *templates*, de forma a mostrar como a complexidade foi identificada (de forma simplificada) no *template* teórico e no *template* empírico, e como foi retratada no *template* final.

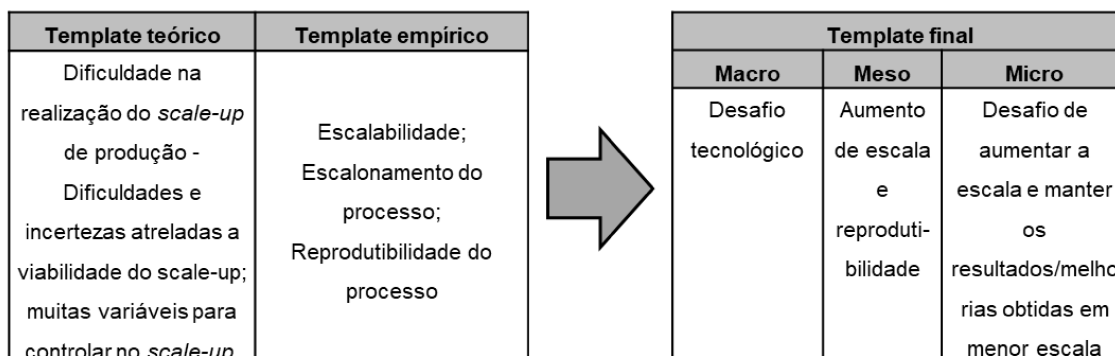
- *Aumento de escala de produção e reprodutibilidade*

O desafio associado ao *aumento da escala de produção e manutenção dos ganhos em propriedades* obtidas em menor escala foi claramente identificado em todos os *templates*. Esta complexidade foi relatada em cinco projetos, que possuem os maiores TRLs estudados. Isso ilustra a relevância e influência de tal complexidade na medida em que há avanços rumo a maturidade tecnológica superiores, o que pode ser visto, por exemplo, no relato de um dos entrevistados:

Do ponto de vista técnico, foi um projeto desafiador pelo volume de material que a gente teria que entregar pra empresa, que era algo sem precedentes até então. Foram 40 quilos de materiais produzidos! Pra isso tivemos que escalonar e manter a reprodutibilidade do processo, que exige parâmetros bem controlados — Fala do Pesq.2 sobre o Proj.3.

A Figura 17 mostra como este elemento de complexidade foi identificado (resumidamente) no *template* teórico e empírico, e como foi retratado no *template* final. Esta forma de explicitar como foi feita comparação entre os *templates* será adotada para todos os subitens do tópico 6.2.1.

Figura 17: "Aumento de escala de produção e reprodutibilidade" nos templates teórico, empírico e final



Fonte: A autora (2023).

Vale ressaltar que no *template* final abaixo este micro-elemento de complexidade foi vinculado ao macro-elemento *desafio tecnológico*. Todavia, este é um dos casos nos quais o elemento de complexidade também pode ser associado a outro macro-elemento, *interação e interdependência*, pois são diversas variáveis técnicas com as quais os pesquisadores têm que lidar durante o aumento de escala e, frequentemente, elas influenciam umas nas outras.

A escolha de vincular o *aumento de escala de produção e reprodutibilidade* ao macro-elemento *desafio tecnológico*, em vez de associá-lo ao macro-elemento “*interação e interdependência*”, foi motivada pela existência de outro micro-elemento de complexidade já contido no macro-elemento *interação e interdependência*: *Muita interdependência e influência de uma variável técnica sobre outra, o que acarreta mudanças significativas no produto*. Nesse sentido, é possível considerar que os desafios no aumento de escala vinculados às interações e interdependências existentes entre as variáveis técnicas já estão contemplados no macro-elemento *interação e interdependência*, mesmo que eles não estejam explicitamente mencionados neste macro-elemento.

Tal estratégia foi adotada em diversos casos nos quais foram identificadas relações entre os macro-elementos de complexidade. Os outros casos não serão explicitamente detalhados nesta tese, contudo ressalta-se que o cuidado de os analisar um a um foi tomado durante a etapa (iii) da construção do *template* final “*reavaliação da melhor forma de agrupar os micro-elementos de complexidade em macro-elementos*”.

- *Tamanho do projeto*

Dificuldades vinculadas ao macro-elemento *tamanho do projeto* (no que tange a duração do projeto, volume de recursos, número de instituições envolvidas e pessoas) foram também amplamente retratadas no *template* teórico e empírico. Como exemplos de falas dos entrevistados, pode-se citar: “Esse projeto é complexo, porque envolveu muitos anos, muita gente, muito recurso e muita burocracia (Fala do Pesq.1 sobre o Proj.1).” Além disso, foi sinalizado o impacto do aumento da complexidade do projeto caso haja a necessidade de interagir com outros grupos de pesquisa e instituições:

(...) antes de entrar esse projeto, o coordenador queria que a gente colaborasse com outro grupo da UFMG... sorte que ele desistiu da ideia, porque seriam pessoas que não necessariamente vão ajudar no projeto (...), aí acaba virando aqueles Frankenstein horríveis (...) — Fala do Pesq.6 sobre o Proj. 10.

Este comentário é digno de destaque pois evidencia a influência que aspectos organizacionais de divisão do trabalho influenciam na elaboração de projetos e no seu desenvolvimento técnico, pois o entrevistado tratou o projeto resultante da junção de diferentes grupos de pesquisadores como “frankstain”. Durante a etapa de análise de dados a pesquisadora recorreu novamente ao entrevistado para entender melhor o que seria esse “frankstein”, que foi detalhado pelo entrevistado como:

É aquele tipo de projeto em que você tem grupos que trabalham com coisas diferentes, mas a alta administração da Universidade só irá permitir a submissão de um projeto no edital, por exemplo. Então os grupos se juntam pra tentar costurar tudo junto para parecer um desenvolvimento único, integrado, sinérgico, mas na verdade a gente está é forçando a barra tecnicamente pra tentar arrumar justificativa para colocar todo mundo junto e submeter o projeto. — Fala do Pesq.6.

O presente estudo sinalizou que poucos trabalhos evidenciam o “como” as estratégias de inovação adotadas pelas instituições influenciam na complexidade tecnológica dos projetos. Na consideração acima, o entrevistado evidenciou um exemplo disto, no qual a estratégia de agregar pessoas adotada por coordenadores de projetos para a elaboração de projetos pode ter um impacto técnico adverso.

Tal visão pode ser diretamente relacionada com o que foi dito no tópico sobre fontes de complexidade tecnológica. Nele é indicado que a opção de agregar profissionais para a elaboração e/ou execução de um projeto seja analisada cautelosamente

juntamente com a complexidade do projeto. Isto porque tal junção pode gerar implicações negativas, passíveis de superar os benefícios projetados devido ao aumento da complexidade do projeto. Ou seja, entende-se que o potencial técnico e comercial da solução desenvolvida no projeto pode ser afetada quando a motivação principal não é a complementaridade e sinergias técnicas entre os grupos para lidar com a complexidade tecnológica, mas sim a mandatoriedade deste junção para que possam competir com outros grupos para a obtenção de recursos.

Outro aspecto evidenciado nesta resposta é a necessidade de junção entre grupos de pesquisa no contexto de editais para a obtenção de recursos públicos. O presente estudo teve como recorte projetos financiados especificamente por empresas, portanto, não é objeto deste a análise de projetos que envolvem a interface direta entre grupos da universidade e instituições públicas de fomento. Entretanto, como houve alusão à alta administração da instituição pública, foi confirmado com o entrevistado que ele fez referência a um tipo de complexidade que ocorre majoritariamente no contexto de submissão de projetos em editais de fomento público.

Tal constatação ilustra que o aumento da abrangência deste estudo para interfaces que envolvem o estabelecimento de projetos entre atores das universidades e agências de fomento pode também agregar conhecimentos e reflexões significativas para as peculiaridades intrínsecas destes desenvolvimentos. Por fim, a Figura 18 mostra como estes elementos de complexidade foram abordados nos *templates* teórico, empírico e final.

Figura 18: "Tamanho do projeto" no template teórico, empírico e final.

Template teórico	Template empírico
Muito tempo demandado para o desenvolvimento - Inovações demoram de 10-15 anos até gerar um produto comercial.	Tempo de duração do projeto; Longa duração influenciada por transições políticas
Demanda por muito recurso ao longo dos anos - Grande injeção de recursos financeiros durante muitos anos sem segurança sobre o retorno.	Tamanho (volume de recursos, pessoal envolvido e burocracia) do projeto;
Necessidade de envolver várias instituições e pessoas ao longo do desenvolvimento.	Grande número de parceiros; Muitas instituições/instâncias envolvidas na contratação e execução do projeto; Gestão de grande quantidade de envolvidos na execução do projeto; Mudanças na empresa parceira; Negociação com várias instituições;
Necessidade de co-desenvolvimento ou o estabelecimento de alianças com conhecedores do mercado.	Dependência de terceiros para o desenvolvimento; Demora no teste de aplicação no parceiro; Seleção conjunta de materiais para desenvolver o projeto; Acesso ao material.

Template final			
Macro	Meso	Micro	
Tamanho	Duração	Duração do projeto	
	Recursos	Volume de recursos envolvidos no projeto	
	Stakeholders/ instituições		Quantidade de stakeholders e instituições parceiras
			Quantidade de instituições executoras
Pessoas		Quantidade de pessoas envolvidas na execução técnica	
		Quantidade de pessoas envolvidas gestão	
		Quantidade de pessoas envolvidas nas aquisições e contratações do projeto	
		Quantidade de instâncias/níveis hierárquicos para a obtenção de aprovações	

Fonte: A autora (2023).

▪ Caracterização

No que tange aos desafios associados à *caracterização*, a literatura retrata especificamente a dificuldade de *acesso a equipamentos robustos, específicos para esta área e de alto valor*. Tal aspecto também foi identificado em uma das entrevistas feitas com os pesquisadores do CTNano/UFMG. Contudo, a questão mais delicada atrelada à caracterização (identificada na análise de cinco projetos) não foi a disponibilidade dos equipamentos em si, mas *sim deficiências em relação à credibilidade das análises realizadas pelos operadores e demora na obtenção dos resultados*.

A identificação destas complexidades abre portas para que sejam levantadas algumas questões: (i) o ambiente de campo, CTNano/UFMG, recebeu investimentos altos para a aquisição de equipamentos próprios de caracterização, o que pode ter sido um facilitador para que a complexidade associada à disponibilidade de infraestrutura fosse pouco aparente nas entrevistas e (ii) questionamentos em relação a

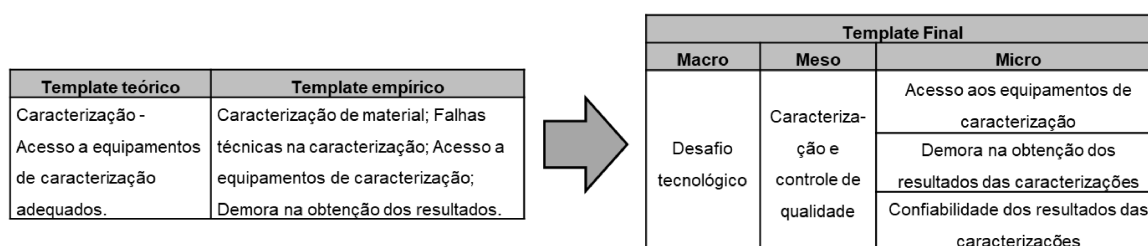
confiabilidade dos resultados das caracterizações obtidas no Centro e, como consequência, a utilização de infraestruturas complementares para a realização de testes adicionais, pode ser um ponto de partida para uma análise crítica sobre a capacitação/know-how dos envolvidos na operacionalização destas caracterizações.

Este tipo de reflexão é de suma importância, já que as caracterizações no CTNano/UFMG são realizadas majoritariamente por alunos de iniciação científica que, naturalmente, rotacionam com maior frequência que pesquisadores. Adicionalmente, a demora na obtenção dos resultados pode ser outro potencial sinal da insegurança dos envolvidos em disponibilizá-los aos pesquisadores do Centro.

Tais reflexões estão em sinergia com o preconiza a literatura da área de NT, que enfatiza muito a especificidade do conhecimento desta área bem como reconhece que a formação de profissionais nela é algo complexo por demandar o acúmulo de conhecimentos de múltiplas áreas. Portanto, ter uma equipe técnica fixa e com grande experiência para a realização de análises de caracterização torna-se um aspecto central a ser avaliado neste contexto.

Vale ressaltar que esse tipo de análise por mais que esteja sendo feito no contexto do CTNano/UFMG pode ser útil para outros contextos pois, em qualquer tipo de pesquisa com nanomateriais a credibilidade dos resultados das caracterizações é algo crítico. Isto porque os resultados das caracterizações são utilizados como inputs para a tomada de decisões sobre os próximos passos dos desenvolvimentos. Tal relevância é retratada, inclusive, de forma explícita na cadeia de valor da NT, vide Figura 1.

Figura 19: "Caracterização" no template teórico, empírico e final.



Fonte: A autora (2023).

- *Science-based business*

Foi identificado nas entrevistas a importância de *conhecer sobre a temática NT* para o estabelecimento de projetos e negócios nesta área. Mais especificamente, foi ressaltada a importância do entendimento do parceiro sobre o que é realizar um desenvolvimento tecnológico a partir de projetos de PD&I e a compreensão de que desenvolvimentos tecnológicos com nanomateriais são investimentos a longo prazo e podem envolver diversos projetos. Tais aspectos convergem com o que retrata a literatura que resalta a importância de entender que o estabelecimento de negócios nessa área são baseados em ciência (*science-based business*).

Ainda, a importância do *compartilhamento de informações técnicas pela empresa parceira* (para nortear os objetivos e o desenvolvimento do projeto) pode ser vista como uma demanda convencional para projetos de natureza extremamente técnica, como os de NT. Contudo, as complexidades identificadas neste tópico vão além do conhecimento que os envolvidos possuem sobre NT.

Elas estão associadas principalmente à mobilização da empresa parceira em relação ao projeto, o que não foi identificado na literatura, mas foi amplamente citado na análise de mais da metade dos projetos. São elas: (i) importância do *comprometimento da empresa parceira no fornecimento de amostras de materiais e realização dos ensaios que são de sua responsabilidade*; (ii) importância da *mobilização da empresa parceira para viabilizar a realização de testes em ambiente relevante/operacional*; (iii) importância da *agilidade da empresa parceira no fornecimento de feedbacks sobre relatórios técnicos e gerenciais, avaliação e aprovação de arranjos financeiros e aditivos*; (iv) importância da *manutenção (ou realização de poucas trocas) da(s) pessoa(s) referência(s) da empresa parceira que são a(s) referência(s) da equipe técnica do projeto*.

Como potenciais justificativas para a presença de tais complexidades, tem-se o grande volume de burocracias existentes nas médias e grandes empresas brasileiras financiadoras dos projetos estudados. Em relação a (i) e (ii) a dificuldade de obtenção de diversas autorizações para acessar o ambiente de campo e para viabilizar a saída de amostras do ambiente de produção foram evidenciadas como fontes destas complexidades. Como exemplo que ilustra tal complexidade, tem-se a consideração a seguir:

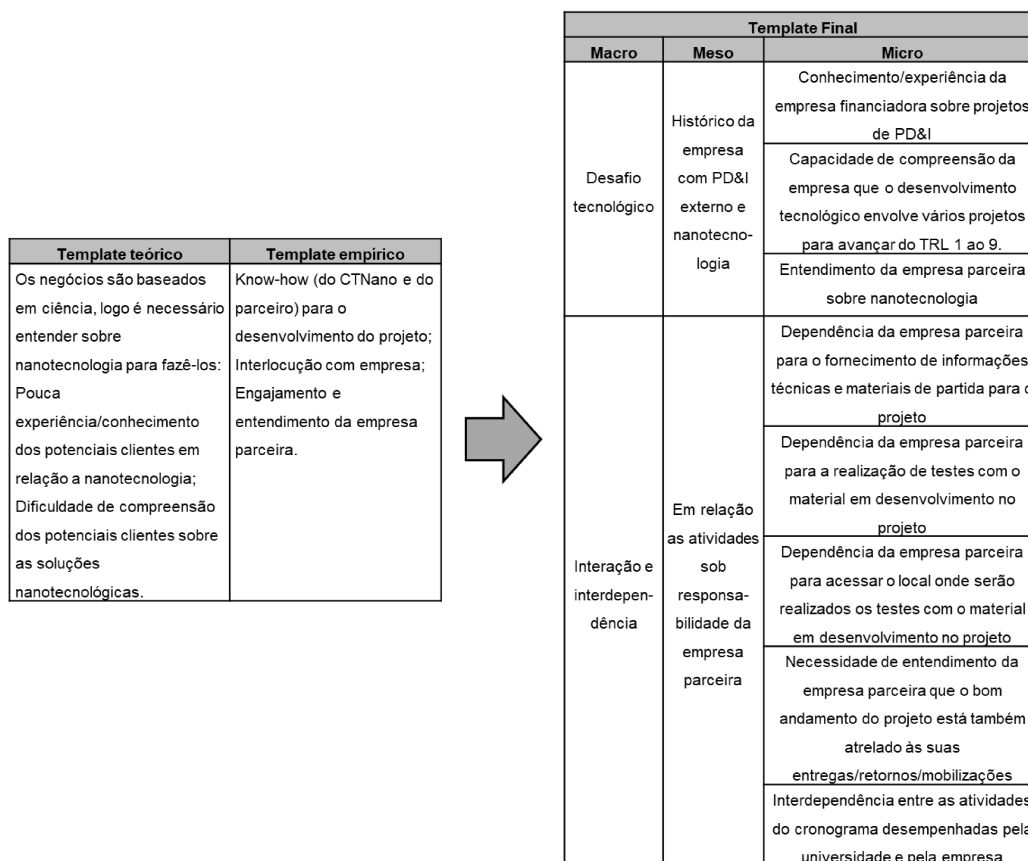
A empresa nos pediu para desenvolver sensor para um gás x que eles têm no processo, só que o próprio interlocutor sinalizou que é inviável fornecer amostra desse gás, então a gente teve que trabalhar com gás de posto de gasolina, mesmo sabendo que tem características diferentes (...), agora eles estão comprando o risco porque não conseguem fornecer o gás, mas dá uma insegurança pra gente quando formos realizar os testes em campo, se a gente conseguir né, já que nem o gás a gente consegue. — Fala do Pesq.5 sobre o Proj. 9.

Para os dois últimos itens, (iii) e (iv), foram sinalizadas como fontes destas complexidades a sobrecarga de trabalho dos parceiros atrelada a necessidade de atender simultaneamente demandas do *core-business* da empresa e dos projetos de inovação, além da troca frequente de profissionais da empresa sem a passagem de informações básicas sobre o projeto e seu histórico.

Tais constatações servem como base para refletir se essas complexidades são mais comuns em projetos financiados por grandes e médias empresas (devido a sua estrutura mais departamentalizada, robusta, burocrática, com maior quantidade de colaboradores e hierarquias, entre outras características), do que em projetos financiados por pequenas empresas. Como o presente estudo não abrangeu projetos financiados por pequenas empresas, tal discussão fica em aberto para a realização de estudos com amostragem mais abrangente.

Ante ao exposto, conclui-se que algo que os gestores de projetos, coordenadores e financiadores devem ter em mente ao se comprometerem com projetos de pesquisa aplicada rumo a TRLs mais altos é que estes projetos podem demandar significativas horas de dedicação da empresa parceira. Sendo que o nível de dedicação e engajamento da empresa pode influenciar tanto positivamente quanto negativamente o avanço do desenvolvimento tecnológico rumo a um produto comercial. Portanto, tal análise e pré-disposição da empresa financiadora com o projeto deve ser algo a ser considerado por todas as partes desde o início da elaboração do cronograma do projeto.

Figura 20: "Science-based business" nos templates teórico, empírico e final



Fonte: A autora (2023).

- *Variáveis técnicas e pivotagem*

O grande número de *variáveis* que influenciam os fenômenos em escala nanométrica, a importância das interações entre elas e a dificuldade em conseguir controlar tudo isso, são aspectos amplamente sinalizados na literatura e que também foram identificados no estudo de campo. Contudo, o estudo de campo trouxe um elemento adicional, não identificado na literatura da área: como os desenvolvimentos em NT são a longo prazo e, como consequência, demandam convencionalmente a realização de vários projetos de PD&I para que seja possível a geração de um produto comercial, a *gestão do conhecimento* desenvolvido ao longo dos anos torna-se algo crítico.

A gestão desse conhecimento desenvolvido ao longo de anos foi retratado como de suma importância nas entrevistas pois, sabe-se que mesmo que parte dos conhecimentos sejam explicitados em relatórios, patentes, artigos, há outros (o conhecimento tácito/*know-how* do profissional) que se perdem com a saída de membros da equipe. Isso impacta, inclusive, em outro elemento de complexidade

muito temido pelos entrevistados: a *pivotagem*. Esta pode estar vinculada à saída de pessoas críticas da equipe, pois processos podem deixar de ser reprodutíveis e propriedades podem não apresentar o mesmo ganho obtido anteriormente.

Tal situação pode acontecer naturalmente, mesmo que seja feita uma boa transição entre os membros e leituras de documentações do projeto pois, a bagagem/experiência do pesquisador que está saindo não é inteiramente passada ao novo entrante. Neste sentido, *pivotagens* significativas causadas por falhas na gestão do conhecimento foram realizadas em dois projetos retratados nas entrevistas.

A importância da *gestão do conhecimento* em projetos de NT torna-se ainda mais crítica ao refletir sobre o contexto brasileiro, no qual a maior parte dos pesquisadores são bolsistas, ou seja, não são profissionais com vínculo empregatício. Ainda, diversos membros das equipes dos projetos são alunos de graduação, mestrandos, doutorandos, que possuem vínculo e motivação orientada majoritariamente pelo alcance de objetivos próprios (entrega de trabalho de conclusão de curso, dissertação ou tese).

Nesse contexto, é importante reconhecer que a rotatividade significativa de membros da equipe executora é uma característica comum dos projetos de PD&I em NT executados nas universidades (seja em colaboração com a iniciativa privada ou não). Portanto, é aconselhável que a coordenação implemente medidas desde o início do projeto, visando assegurar a preservação e disseminação do conhecimento adquirido ao longo dos anos.

Figura 21: "Variáveis técnicas e pivotagem" nos templates teórico, empírico e prático

		Template Final		
		Macro	Meso	Micro
Template teórico	Template empírico			
Muitas variáveis técnicas envolvidas - Grande número de variáveis influenciam os fenômenos em escala nanométrica.	Muitas variáveis para controlar	Tamanho	Variáveis técnicas	Grande número de variáveis técnicas influenciam os fenômenos em escala nanométrica
Variáveis técnicas são interdependentes e essa interdependência influencia diversos aspectos do desenvolvimento tecnológico - Grande número de variáveis influenciam os fenômenos em escala nanométrica; alterações mínimas no processo de fabricação resultam em mudanças significativas nas propriedades do produto.	Grande influência entre as variáveis técnicas e aspectos externos (ex: temperatura, umidade etc.); Influência de características do nanomaterial para a nanoaplicação	Interação e interdependência	Entre a equipe executora do projeto	Necessidade de transferência do conhecimento para novos entrantes Retenção de pessoal diante das incertezas em relação a disponibilidade dos recursos financeiros
Dificuldades associadas a mudança do rumo do desenvolvimento e/ou testagem de abordagens alternativas - Dificuldade em pivotar, comparado a desenvolvimentos tecnológicos em outras áreas; Desafios de realizar experimentos de alta fidelidade com baixo custo e prazo.	Dificuldades atreladas à pivotagem (acesso a infraestrutura, equipamentos, insumos, esforço demandado); Gestão de compras nacionais e importação; Gestão do conhecimento técnico.		Entre as variáveis técnicas	Muita interdependência e influência de uma variável técnica sobre outra, o que acarreta mudanças significativas no produto
			Entre diferentes setores da fundação de apoio	Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio para a realização de cada nova aquisição
		Desafio tecnológico	Estrutura da matéria	Forte influência da estrutura da matéria no processo de desenvolvimento de um produto
			Pivotagem	Mudanças no rumo do desenvolvimento não é algo simples e testagem de estratégias alternativas pode ser muito custoso devido ao tempo demandado para os testes, dificuldade de acesso a infraestrutura e pessoal capacitado

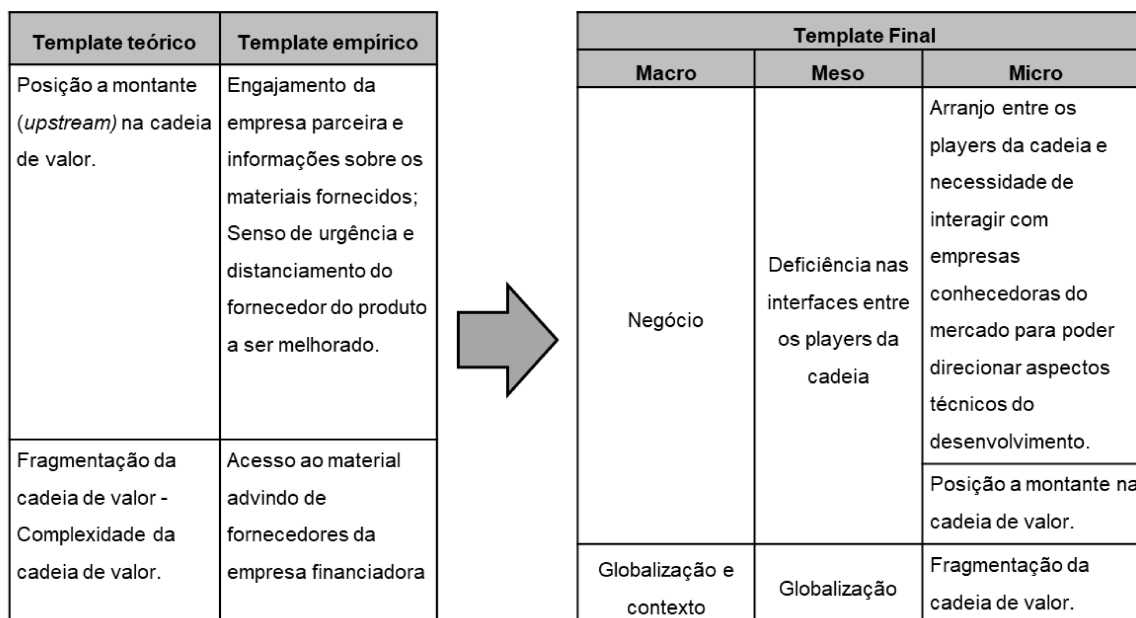
Fonte: A autora (2023).

- *Cadeia de valor*

A complexidade de uma cadeia de valor fragmentada e a posição upstream foram aspectos retratados como dificultadores para o desenvolvimento dos projetos de PD&I em NT. Isso foi sinalizado principalmente no que tange a necessidade de fornecimento de informações e materiais centrais para a realização do projeto. Um exemplo disso foi a consideração do pesquisador 2 em relação aos projetos 3 e 4: "A gente teve que correr atrás dos fornecedores dos materiais, nos dois projetos, porque a própria empresa que compra não tem domínio das características do que eles estão comprando." Outro exemplo foi o pesquisador 7 em relação ao projeto 14: "Era pra ser

um projeto que envolvesse um arranjo entre duas empresas da cadeia, uma que utiliza o produto e outra que fornece, mas conseguir colocar todo mundo na mesma página parecia uma missão impossível!”.

Figura 22: "Cadeia de valor" nos templates teórico, empírico e final.



Fonte: A autora (2023).

6.2.2 Exemplos complexidades identificadas na literatura, mas não foram abordadas nas entrevistas de campo

- *Complexidades relacionadas com o distanciamento geográfico, fuso horário e diferenças culturais*

Houve elementos que estiveram presentes na literatura estudada, mas não foram manifestados pelos entrevistados, tais como: *dificuldades vinculadas ao distanciamento geográfico entre os envolvidos, diferenças culturais e de linguagem e dificuldade de comunicação devido a diferença de fuso horário*. Uma potencial justificativa para esta não identificação durante as entrevistas de campo, pode ser associada ao fato de que todos os projetos do CTNano/UFMG são desenvolvidos em território brasileiro e não possuem colaboradores que estejam em fusos distintos e/ou no exterior. Contudo, acredita-se que tais complexidades são relevantes em cenários diferentes teste, o que motiva a realização de estudos complementares à presente tese.

- *Contexto regulatório das NTs e SMS*

Preocupações vinculadas ao desenvolvimento do *contexto regulatório das NTs e questões de SMS*, não foram elementos de complexidade identificados em campo. Como potencial justificativa para a ausência de citações atreladas ao contexto regulatório das NTs, tem-se o fato de que os TRLs de todos os projetos estudados eram iguais ou inferiores ao TRL6. Ou seja, talvez, por ainda estarem relativamente longe da exploração comercial, tal aspecto pode estar sendo temporariamente colocado de lado.

Contudo, como tal aspecto ficou muito evidente na literatura da área de NT, sugere-se o aumento da amostragem dos projetos avaliados e consulta a especialistas na área de SMS. Tal consulta contribuiria para avaliar qual deve ser a preocupação com aspectos de SMS em cada estágio de maturidade tecnológica. Agregar este tipo de informação na análise de complexidade do projeto pode ajudar a antecipar riscos e desenvolver estratégias de mitigação adequadas, tais como:

- (i) estar sempre atento ao desenvolvimento das regulamentações que estão sendo desenvolvidas na área sobre preocupações com a segurança e o impacto ambiental da utilização dos nanomateriais;
- (ii) utilizar protocolos e/ou orientações existentes no que concerne à manipulação e descarte dos nanomateriais, de forma a garantir que a equipe de pesquisadores do projeto sempre utilize os equipamentos de proteção individual adequados para manipulá-los e que a destinação apropriada seja dada aos resíduos advindos dos processos produtivos;
- (iii) inclusão de aspectos de SMS (mesmo que de forma preliminar) durante a elaboração de projetos de PD&I em NT — mesmo em projetos iniciados em TRLs menores —, com o objetivo de garantir que o desenvolvimento tecnológico seja acompanhado por profissionais com *background* na área de SMS e que possam contribuir com orientações para a equipe executora e realização de ensaios de toxicologia e análise do ciclo de vida do produto (quando for o momento adequado), entre outros.

- *Proteção da propriedade intelectual*

No que tange as complexidades associadas às negociações sobre a *estratégia de proteção e exploração comercial da propriedade intelectual*, estas provavelmente não foram comentadas nas entrevistas pois, este tipo de negociação no contexto do CTNano/UFMG, não fica sob responsabilidade e a cargo da supervisão e/ou coordenação técnica do projeto, mas sim do gestor do projeto (membro da Frente de Operações do Centro) e do Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) da UFMG, a CTIT.

As ações de proteção intelectual e transferência tecnológica na UFMG são gerenciadas pela Coordenadoria de Transferência e Inovação Tecnológica (CTIT). Sendo, que no contexto do CTNano/UFMG, o gestor do projeto é o responsável por intermediar a interface entre a Procuradoria Federal da UFMG, NIT/CTIT, jurídico da empresa parceira e jurídico da fundação de apoio (Fundep/FCO). Portanto, é este profissional dentro do CTNano/UFMG que lida diretamente com os elementos de complexidade associados a tais negociações, e não os profissionais que foram entrevistados neste estudo.

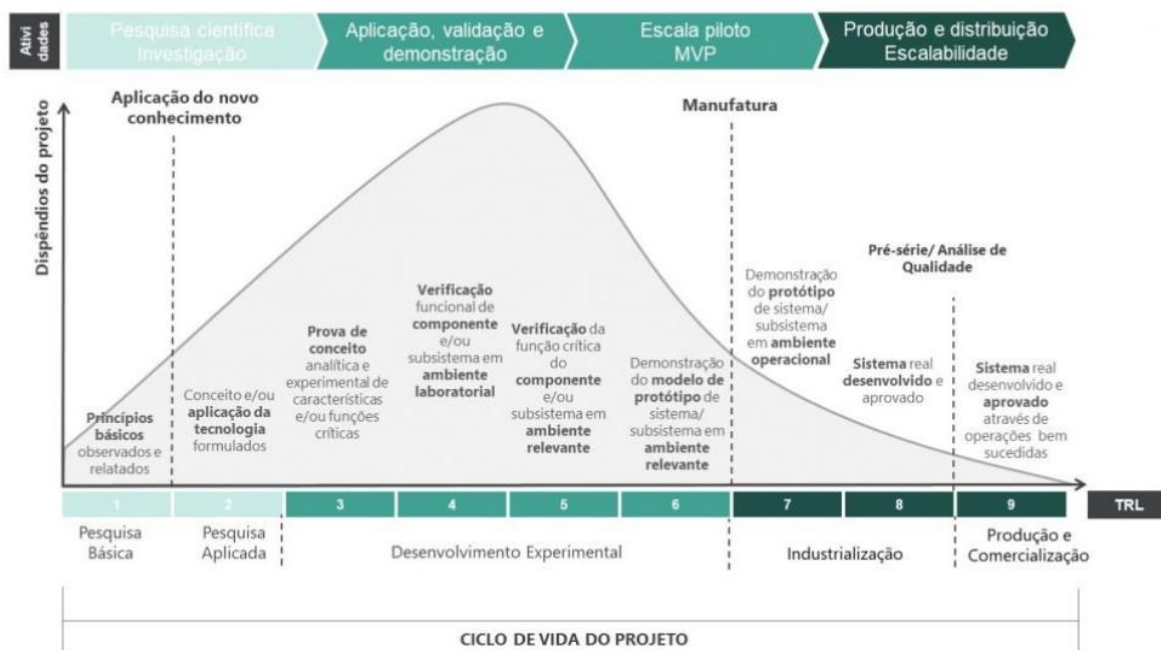
Ainda, vale ressaltar que, por não terem sido lembrados, provavelmente os elementos de complexidade associados à *estratégia de proteção da propriedade intelectual* não devem ser objeto de grandes preocupações por parte dos pesquisadores entrevistados no CTNano/UFMG. Supõe-se isso pois a UFMG é cotitular de potenciais patentes/proteções advindas dos projetos 14 projetos estudados. Neste sentido, a CTIT sempre aciona diretamente o gestor do projeto caso haja alguma questão a ser tratada/negociada com a empresa (ou aciona o coordenador do projeto/titular principal da propriedade intelectual desenvolvida no projeto, que direciona a demanda ao gestor no CTNano/UFMG).

Além disso, a CTIT é um NIT referência a nível nacional, devido a sua ampla experiência e *expertise* na proteção e gestão de propriedade intelectual da UFMG. Este NIT foi criado em 1997 e até hoje já realizou 2139 pedidos de proteção intelectual nacional e internacional (CTIT, 2023). Ou seja, acredita-se que este possui grande credibilidade e confiança dentro não só comunidade da UFMG, mas também a nível nacional, o que favorece uma menor preocupação dos inventores de que seus interesses estão sendo defendidos.

- *Exploração da propriedade intelectual*

Conforme abordado no tópico 5.1, quando analisados, os projetos estavam nos seguintes TRLs: TRL3 (dois projetos), TRL4 (nove projetos), TRL 5 (um projeto) e TRL6 (dois projetos). Segundo a ABGI (2019) as preocupações sobre manufatura, industrialização e comercialização de tecnologias ficam mais evidentes quando os desenvolvimentos tecnológicos chegam no TRL 7, Figura 23.

Figura 23: TRL e ciclo de vida do produto



Fonte: ABGI (2019).

Diante disso, acredita-se que a não sinalização de complexidades relacionadas à *exploração comercial das tecnologias* pode ser justificada pois dois principais aspectos: (i) pelo fato de que os projetos estudados estavam sendo financiados pelas respectivas empresas parceiras que firmaram o termo de cooperação com a UFMG (ou seja, estas, a princípio, seriam as potenciais interessadas na exploração comercial da propriedade intelectual do projeto, então não havia a necessidade/preocupação eminente de busca por outro interessado) e (ii) nenhum dos projetos havia chegado em TRL 7, estágio de maturidade tecnologia no qual espera-se ativamente, no contexto do CTNano/UFMG, que haja a transferência tecnológica para a empresa financiadora ou para uma *spin-off* (RESENDE et al., 2017).

- *Possibilidades de múltiplos mercados*

Complexidades associadas às *possibilidades de múltiplos mercados de atuação* do desenvolvimento tecnológico em questão também não foram evidenciadas pelos entrevistados neste estudo. Acredita-se que tal ausência pode ser associada ao fato de que: (i) este tipo de discussão geralmente é mais enfatizado quando estão sendo negociados os termos do instrumento jurídico do projeto, mais especificamente na seção de propriedade intelectual e (ii) as empresas financiadoras dos projetos definem, durante a fase de elaboração/prospecção do projeto, uma aplicação central para o desenvolvimento tecnológico que está sendo discutido.

Conforme dito anteriormente, quem está à frente da negociação do instrumento jurídico no CTNano/UFMG são os profissionais de gestão, que não foram entrevistados nesta pesquisa. Diante disso, a presença deste tipo de complexidade poderia ser estrategicamente avaliada com o aumento da amostragem dos entrevistados, tanto dentro do CTNano/UFMG (podendo também incorporar entrevistas com profissionais da CTIT que também estão envolvidos em tais negociações), quanto abrangendo também profissionais que possuem este papel em outras instituições (universidades, NITs, entre outros).

Além disso, na etapa de elaboração/prospecção do projeto é natural a definição de uma aplicação e mercado inicial para o desenvolvimento tecnológico, sendo que esta é a diretriz principal para a execução do projeto. Contudo, mesmo que ao longo do desenvolvimento do projeto possam ser identificadas outras aplicações e mercados de interesse para a tecnologia, estas, muito provavelmente, tornam-se periféricas e recebem menos atenção dos pesquisadores que as identificam, já que eles estão lidando com outras complexidades inerentes ao desenvolvimento tecnológico.

- *Adaptações de métodos e técnicas para o desenvolvimento de produtos com NT e indicadores/métricas que ilustram a evolução do desenvolvimento tecnológico*

Não foi identificada nenhuma fala sobre complexidades associadas à *importância e/ou dificuldade na adaptação de métodos e técnicas para o desenvolvimento de produtos com NT e abordagens diferenciadas de pesquisa de mercado*. Isto também não foi visto para o caso de *indicadores/métricas que ilustram a evolução do desenvolvimento tecnológico com nanomateriais*.

Como o perfil/*background* dos entrevistados é majoritariamente técnico, é esperado que a atuação e preocupações deles sejam majoritariamente atreladas a aspectos técnicos dos desenvolvimentos. A divisão entre funções diretamente associadas a aspectos técnicos e gerenciais é algo bem estabelecido dentro do CTNano/UFMG. Pois os aspectos técnicos do desenvolvimento ficam a cargo do supervisor do projeto e coordenador (entrevistados nesta pesquisa), e as questões gerenciais a cargo do gestor.

Considerando tal divisão entre as responsabilidades, a manifestação de elementos de complexidade associados a métodos e técnicas aplicados ao desenvolvimento de produtos com NT e abordagens diferenciadas de pesquisa de mercado deveria vir por parte dos gestores, caso estes tivessem sido entrevistados. Isto também se aplica a importância dada aos indicadores/métricas que ilustram a evolução do desenvolvimento tecnológico pois, caso haja alguma discussão com o parceiro/financiador/CTIT/Procuradoria Federal da UFMG neste sentido, esta será uma responsabilidade do gestor do projeto, que irá acionar os responsáveis técnicos caso seja necessário.

Com base na experiência da autora da presente tese, tal experiência já ocorreu anteriormente diversas vezes e, os supervisores/coordenadores somente foram acionados para validar o conteúdo elaborado pelo gestor. Ou seja, a manifestação de tais complexidades provavelmente viriam caso os profissionais que atuam na frente de operações do CTNano/UFMG fossem entrevistados.

De forma mais ampla, pensando no aumento da abrangência deste estudo para outros contextos que não tenham essa distinção entre as funções/responsabilidades técnicas/gerenciais, tais preocupações provavelmente poderiam ser também manifestadas por profissionais com *background* técnico que tenham que lidar diretamente com essas complexidades. Diante disso, o aumento de amostragem dos entrevistados para contextos além do CTNano/UFMG seria algo muito bem visto para validar tal suposição.

Por fim, tendo como referência as seis divergências explanadas neste tópico, por mais que os elementos de complexidade supracitados não estejam contemplados no *template* resultante desta tese, diversos autores da literatura os citaram como

relevantes para a complexidade de projetos. Portanto, tal diferença pode ser vista como uma motivação adicional para expansão deste estudo a partir da análise de um maior número de projetos e profissionais.

6.2.3 *Utilização do template de elementos de complexidade de forma estratégica no planejamento, execução e avaliação de projetos de NT*

- *Utilização do template pelos gestores de projetos*

Para gestores de projetos de NT a análise da complexidade a partir da utilização do *template* pode contribuir tanto na elaboração do projeto quanto em sua gestão. Isto é possível pois o *template* é um instrumento de análise diagnóstica e prognóstica, que pode ser empregado tanto na avaliação da situação vigente de um projeto, quanto na antecipação de implicações futuras que os elementos de complexidade previamente mapeados podem acarretar.

Mais especificamente, durante a concepção dos projetos, os gestores podem utilizar o *template* para a realização de uma análise prognóstica das complexidades que seriam potencialmente influentes no andamento do projeto, de forma a evitar que ocorram, no decorrer de sua execução, situações futuras indesejadas. Já na gestão de projetos complexos de NT, os gestores podem utilizar o *template* para analisar, diagnosticar e lidar com situações nas quais há a influência de complexidades que, se não tratadas, podem reduzir as chances de sucesso do projeto.

Ao empregar o *template* nesta análise, pode ficar evidente para o gestor a presença de relações entre os macro-elementos de complexidade. Estas relações também foram identificadas, principalmente, ao examinar o conteúdo das codificações dos dados empíricos. Elas se manifestam por meio de interseções e influências mútuas, indicando que os macro-elementos mapeados podem, aparentemente, exercer influência, impacto ou estar associados de alguma maneira a outros macro-elementos. Conforme exemplificado no tópico 6.1, ao desenvolver o *template*, foram adotadas as precauções necessárias para considerar a presença de tais relações.

Os gestores devem observar que os micro-elementos de complexidade são um desdobramento dos macro-elementos estudados. Cada um deles pode ser avaliado individualmente em relação a um projeto específico. Esta análise pode ser feita para

contribuir com o julgamento da complexidade atrelada ao projeto durante sua elaboração ou execução, de modo a identificar as complexidades mais específicas que o desenvolvimento em questão estará ou está sujeito.

Neste sentido o estudo da CP de PD&I em NT agrega valor ao dia a dia do gestor de projetos, robustecendo seu conhecimento sobre as características próprias dos desenvolvimentos nesta área, de forma a elucidar quais complexidades podem impactar o andamento destes projetos e que, se não tratadas, podem contribuir para que as expectativas de comercialização de produtos nanotecnológicos não se concretizem.

A seguir, será detalhado um exemplo ilustrativo de como a análise de complexidade pode auxiliar na antecipação de implicações futuras de uma decisão estratégica durante a elaboração de um projeto de NT.

Considere um cenário no qual um grupo de pesquisa (nomeado grupo A) está negociando com uma empresa um projeto de PD&I em NT. Durante a fase de elaboração do projeto, foi levantado pela empresa financiadora a potencial complementaridade técnica entre três grupos de pesquisa distintos, localizados em regiões geográficas distintas.

Neste exemplo é considerado estratégico que a análise de complexidade seja feita pelo grupo A, mais especificamente pelo coordenador e gestor deste grupo de pesquisa, já que eles são os responsáveis pela negociação com a empresa (além de que o coordenador será o responsável técnico pela execução do projeto). Além disso, espera-se que esta análise de complexidade seja iniciada a partir do momento em que a empresa financiadora levantar a potencial complementaridade técnica entre os três grupos de pesquisa. Este momento é estratégico para que o grupo A já comece a pensar criticamente neste tipo de interface e, portanto, possa utilizar os insights gerados a partir de tal análise para nortear e direcionar as conversas com a empresa financiadora.

A análise de complexidade é iniciada a partir do momento em que o grupo A tem em mãos o *template* de elementos de complexidade e começa a refletir sobre qual seria o potencial impacto da inclusão de mais dois grupos de pesquisa no projeto em negociação. Este potencial impacto deve ser analisado passando por cada macro e

micro elemento de complexidade do *template*, de modo a grifar neste os elementos de complexidade que seriam impactados com tal inclusão. A seguir será mostrado como poderia discorrer tal análise.

O envolvimento destes três grupos (nomeados A, B e C) na execução técnica do projeto traria um aumento de complexidade para sua execução, pois acarretaria um aumento na *quantidade de envolvidos*, demandaria uma maior *interação e interdependência* entre eles e suas respectivas instituições, que estarão presentes em *diferentes localizações geográficas*, complexidades identificadas como significativas para um projeto de PD&I. Tendo ciência deste aumento significativo de complexidade, o primeiro passo seria analisar criticamente a necessidade do envolvimento dos três grupos a partir do mapeamento detalhado de quais seriam as potenciais contribuições de cada um deles no cronograma do projeto.

Por exemplo, a preparação de amostras seria realizada pelo grupo B, único grupo que possui os equipamentos adequados para tal, o que contribuiria significativamente para a fluidez do cronograma do projeto, já que a preparação de amostras sempre será algo crítico ao longo da execução. Este grupo seria responsável por enviar as amostras para outro(s) grupo(s) realizar(em) os ensaios laboratoriais de processamento e caracterização.

Os grupos A e C possuem praticamente acesso aos mesmos equipamentos e infraestrutura laboratorial para a realização de todos os ensaios ao longo do desenvolvimento do projeto. Com exceção de um equipamento específico de caracterização que será mandatório para a realização de um ensaio pontual no cronograma, mas crítico e igualmente importante seu para seu andamento. Tal equipamento é caro e somente está presente na infraestrutura do grupo C o que, a princípio, seria o argumento conclusivo para selar sua participação como partícipe no termo de cooperação do projeto.

Contudo, ao inserir o grupo C como partícipe, para ficar mais equilibrada a participação dos envolvidos, seria natural que o grupo A e C passassem a dividir também as responsabilidades sobre mais atividades do cronograma que poderiam ser realizadas por ambos. Como consequência, a gestão do fluxo de informações e comunicação entre esses dois grupos passa a ser algo central para o bom andamento

do projeto durante toda sua execução. Além de que, o orçamento do projeto deverá também prever a alocação de recursos financeiros significativos para ambos, o que envolverá, por exemplo, bolsistas sendo contratados em por diferentes instituições e aquisições sendo enviadas para endereços distintos. Outro aspecto que também será influenciado pela entrada do grupo C como partícipe do termo de cooperação é que a tramitação deste termo passará a incluir outra instituição pública, ou seja, envolverá uma série de tramitações, análises, aprovações e demandas por mudanças no instrumento jurídico próprias desta instituição.

Os exemplos citados acima de como a inclusão do grupo C acarretaria um aumento de complexidade significativo para o projeto, são apenas algumas das diversas consequências com as quais as lideranças do projeto teriam que lidar. Isto geraria um esforço gerencial consideravelmente superior ao que seria demandado caso houvesse, somente, a inclusão do grupo B no termo de cooperação.

Dito isto, o acesso ao *template* de análise de complexidades desenvolvido no presente estudo e sua utilização para o estabelecimento de uma análise crítica sobre este cenário poderia ser o divisor de águas entre tomar uma decisão aparentemente adequada (incluir o grupo C no termo de cooperação, uma vez que ele tem como contribuir significativamente para o projeto) é uma decisão estratégica para evitar o aumento significativo da complexidade do projeto.

Como exemplo de decisão estratégica que poderia ser tomada com base nas informações e análises de complexidade supracitada, tem-se a possibilidade de avaliar com o grupo C se eles prestam serviços de análises de caracterização com o equipamento demandado pelo projeto. Isto é uma prática que também está prevista no art. 9º da Lei de Inovação Tecnológica - Lei n.º 10.973, de 2 de dezembro de 2004 (BRASIL, 2004), e é convencionalmente adotada por pesquisadores em todo o Brasil para angariar recursos para os seus laboratórios. Tais serviços poderiam ser contratados pelo projeto, desde que fosse previsto no seu orçamento recursos na rubrica de serviços de terceiros para a realização de tais ensaios pelo grupo C, conforme estimativa do valor praticado pelo grupo ou orçamento.

A adoção desta estratégia evitaria o aumento significativo da complexidade do projeto no que tange a: (i) *quantidade de envolvidos*; (ii) *interação e interdependência entre*

eles em relação a atividades do cronograma, contratações e aquisições; (iii) interação e interdependência entre suas respectivas instituições; (iv) gestão contínua da comunicação entre profissionais presentes em diferentes regiões geográficas, entre diversos outros aspectos.

Isto porque a atuação do grupo C no projeto seria pontual e bem delimitada como prestador de serviço, e não como partícipe do termo de cooperação. Então ele seria remunerado especificamente pelo serviço prestado utilizando de sua infraestrutura e sua competência técnica, mas não estaria envolvido em interfaces complexas como as supracitadas, além de diversas outras que também entrariam em discussão durante a negociação do projeto, como por exemplo *negociações do instrumento jurídico* a ser firmado entre as instituições envolvidas (o que inclui o aspecto de *propriedade intelectual*, muito sensível nestas negociações).

Com o objetivo de ilustrar de forma simples e visual o impacto que a adoção da estratégia de contratação do grupo C como prestador de serviços (ao invés de como partícipe do termo de cooperação do projeto) resultaria na complexidade deste projeto tem-se o Quadro 15 e Quadro 16. Ambos possuem como base o *template* de elementos de complexidade resultante do presente estudo.

No *template* do Quadro 15 foram coloridos de amarelo todos os macro e micro elementos de complexidade que seriam impactados com a inclusão do grupo C como partícipe do termo de cooperação. Já o Quadro 16 conta com as marcações atualizadas considerando a contratação do grupo C como prestador de serviço do projeto. O Quadro 16 possui elementos de complexidade coloridos de amarelo e de amarelo claro. Tal distinção foi feita com o intuito de sinalizar que há elementos de complexidade que ainda irão existir neste segundo cenário (tanto os amarelos quanto os amarelos claro), mas que, com base no novo formato de contratação alguns deles serão menos influentes no projeto (os coloridos de amarelo claro).

Um ponto importante de se ressaltar é que o *template* resultante do presente estudo não possui o elemento de complexidade de diferentes *localizações geográficas*, pois ele não foi identificado na coleta de dados empíricos. Portanto, tal aspecto não pode ser visto no Quadro 15 e Quadro 16 mesmo que, considerando os cenários apresentados, acredita-se que as diferenças na localização geográfica entre os

grupos envolvidos seria sim uma fonte de complexidade adicional para a interface a ser estabelecida. Tal constatação é mais um exemplo do potencial promissor de abordagens futuras (que aumentem a amostragem da coleta de dados de campo) agregarem novos elementos de complexidade ao *template* resultante da presente tese de forma a torná-lo mais completo.

Para concluir, a partir da rápida comparação visual entre o Quadro 15 e Quadro 16 é possível constatar diferenças significativas na complexidade do projeto caso fosse adotada uma ou outra estratégia de relação com o grupo C. Outra forma de visualização é a partir da confecção de um gráfico de radar que comparasse a potencial complexidade do projeto nos dois cenários: a partir da inclusão do grupo C como partícipe ou como prestador de serviço.

Quadro 15: Elementos de complexidade (coloridos em amarelo) que estariam presentes caso o grupo C fosse incluído como partícipe do projeto

ELEMENTOS DE COMPLEXIDADE		
Macro	Meso	Micro
Tamanho	Duração	Duração do projeto
	Recursos	Volume de recursos envolvidos no projeto
	Mercados	Quantidade de possíveis mercados em que a tecnologia pode ser inserida
	Stakeholders/ instituições	Quantidade de stakeholders instituições parceiras
		Quantidade de instituições executoras
	Pessoas	Quantidade de pessoas envolvidas na execução técnica
		Quantidade de pessoas envolvidas gestão
Quantidade de pessoas envolvidas nas aquisições e contratações do projeto		
Interação e interdependência	Tramitações/ aprovações do projeto	Dependência de aprovação/tramitação sequencial entre várias instâncias/níveis hierárquicos de uma mesma instituição
		Dependência de aprovação/tramitação sequencial entre várias instâncias/níveis hierárquicos de diferentes instituições
	Documentações do projeto	Negociação do instrumento jurídico considerando os interesses distintos de várias instituições
		Negociação do plano de trabalho considerando os interesses distintos de várias instituições
	Entre diferentes setores da fundação de apoio	Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio para a realização de cada aquisição
		Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio para a realização de contratações de pessoal
		Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio e da empresa parceira para evitar problemas na prestação de contas
	Em relação às atividades sob responsabilidade da empresa parceira	Dependência da empresa parceira para o fornecimento de informações técnicas e materiais de partida para o projeto
		Dependência da empresa parceira para a realização de testes com o material em desenvolvimento no projeto
		Dependência da empresa parceira para acessar o local onde serão realizados os testes com o material em desenvolvimento no projeto
		Necessidade de entendimento da empresa parceira que o bom andamento do projeto está também atrelado às suas entregas/retornos/mobilizações
	Entre a equipe executora do projeto	Interdependência entre as atividades do cronograma desempenhadas pela universidade e pela empresa
		Necessidade de transferência do conhecimento para novos entrantes
		Retenção de pessoal diante das incertezas em relação a disponibilidade dos recursos financeiros
Desafio tecnológico	Pessoal qualificado e c/ background	Dependência de profissionais técnicos que atendem simultaneamente a demandas de diferentes projetos e não estão focados em um só desenvolvimento
		Contratação e retenção de pessoal qualificado e com background na área
	Know-how (da universidade) na área de nanotecnologia	Know-how para escrever uma proposta de projeto
		Know-how para executar o projeto
		Know-how para captar e gerir o projeto
	Histórico da empresa com PD&I externo e nanotecnologia	Conhecimento/experiência da empresa parceira sobre projetos de PD&I
		Capacidade de compreensão da empresa que o desenvolvimento tecnológico envolve vários projetos para avançar do TRL 1 ao 9.
Aumento de escala e reprodutibilidade	Entendimento da empresa parceira sobre nanotecnologia	
Caracterização e controle de qualidade	Desafio de aumentar a escala e manter os resultados	
	Demora na obtenção dos resultados das caracterizações	
Negócio	Deficiência nas interfaces entre os players da cadeia	Confiabilidade dos resultados das caracterizações
		Arranjo entre os players da cadeia
Globalização e contexto	Globalização	Inserção na cadeia de valor: a jusante ou a montante
		Fragmentação da cadeia de valor
	Contexto	Influência do contexto político
		Presença de instabilidades gerais (ex: desastres ambientais, eventos de pandemia, fusões entre empresas...)
		Fragmentação das atividades, responsabilidades e aprovações no processo de compra

Divisão do trabalho	Divisão do trabalho e tomadores de decisão entre equipes distintas de uma mesma instituição	Fragmentação das atividades, responsabilidades e aprovações no processo de contratação de pessoal
		Fragmentação das atividades de análise e aprovação do projeto entre instâncias de uma mesma instituição
		Atividades sem prazo limite e sem prejuízos para os envolvidos caso sua execução se dê de forma deficiente
	Divisão do trabalho e tomadores de decisão entre instituições diferentes que compõem o projeto	Dificuldade de convergir negociações com várias instituições que possuem interesses, nível de envolvimento e comprometimento distinto
		Tramitações sem prazo limite e sem prejuízos para os envolvidos caso sua execução se dê de forma deficiente
		Burocracias e tramitações específicas para cada instituição envolvida
		Contratação de serviços de terceiros que não estão igualmente comprometidos com o projeto
Gestão do projeto	Ferramentas gerenciais utilizadas	Gestão do conhecimento
		Gestão da comunicação entre os envolvidos
	Riscos e criticidades mapeadas	Complexidade na retenção de pessoal qualificado/background (turnover)
		Manter a infraestrutura operacional
		Entendimento e nível de engajamento da empresa parceira com o projeto
		Compatibilidade entre escopo e orçamento disponível e negociações envolvendo diferentes interesses
		Compatibilidade entre escopo e duração prevista
		Conflitos de interesse na alocação dos recursos financeiros do projeto
		Gestão de pessoas com backgrounds e experiências distintas

Fonte: A autora (2023)

Quadro 16: Elementos de complexidade (diferenciados em amarelo e amarelo claro) que estariam presentes caso o grupo C fosse prestador de serviços

ELEMENTOS DE COMPLEXIDADE		
Macro	Meso	Micro
Tamanho	Duração	Duração do projeto
	Recursos	Volume de recursos envolvidos no projeto
	Mercados	Quantidade de possíveis mercados em que a tecnologia pode ser inserida
	Stakeholders/instituições	Quantidade de stakeholders/instituições executoras
		Quantidade de instituições parceiras
	Pessoas	Quantidade de pessoas envolvidas na execução técnica
		Quantidade de pessoas envolvidas gestão
		Quantidade de pessoas envolvidas nas aquisições e contratações do projeto
Quantidade de instâncias/níveis hierárquicos para a obtenção de aprovações		
Interação e interdependência	Tramitação/aprovação do projeto	Dependência de aprovação/tramitação sequencial entre várias instâncias/níveis hierárquicos de uma mesma instituição
		Dependência de aprovação/tramitação sequencial entre várias instâncias/níveis hierárquicos de diferentes instituições
	Documentações do projeto	Negociação do instrumento jurídico considerando os interesses distintos de várias instituições
		Negociação do plano de trabalho considerando os interesses distintos de várias instituições
	Entre diferentes setores da fundação de apoio	Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio para a realização de cada aquisição
		Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio para a realização de contratações de pessoal
		Dependência da interação e alinhamento entre pessoas de diversos setores da fundação de apoio e da empresa parceira para evitar problemas na prestação de contas
	Em relação às atividades sob responsabilidade da empresa parceira	Dependência da empresa parceira para o fornecimento de informações técnicas e materiais de partida para o projeto
		Dependência da empresa parceira para a realização de testes com o material em desenvolvimento no projeto
Dependência da empresa parceira para acessar o local onde serão realizados os testes com o material em desenvolvimento no projeto		

		Necessidade de entendimento da empresa parceira que o bom andamento do projeto está também atrelado às suas entregas/retornos/mobilizações
		Interdependência entre as atividades do cronograma desempenhadas pela universidade e pela empresa
		Necessidade de transferência do conhecimento para novos entrantes
		Retenção de pessoal diante das incertezas em relação a disponibilidade dos recursos financeiros
Desafio tecnológico	Entre a equipe executora do projeto	Dependência de profissionais técnicos que atendem simultaneamente a demandas de diferentes projetos e não estão focados em um só desenvolvimento
	Pessoal qualificado e com background na área	Contratação e retenção de pessoal qualificado e com background
	Know-how (da universidade) na área de nanotecnologia	Know-how para escrever uma proposta de projeto
		Know-how para executar o projeto
		Know-how para captar e gerir o projeto
	Histórico da empresa com PD&I externo e nanotecnologia	Conhecimento/experiência da empresa parceira sobre projetos de PD&I
Capacidade de compreensão da empresa que o desenvolvimento tecnológico envolve vários projetos para avançar do TRL 1 ao 9.		
Entendimento da empresa parceira sobre nanotecnologia		
Aumento de escala e reprodutibilidade	Desafio de aumentar a escala e manter os resultados	
Caracterização e controle de qualidade	Demora na obtenção dos resultados das caracterizações	
	Confiabilidade dos resultados das caracterizações	
Negócio	Deficiência nas interfaces entre os players da cadeia	Arranjo entre os players da cadeia
		Inserção na cadeia de valor: a jusante ou a montante
Globalização e contexto	Globalização	Fragmentação da cadeia de valor
	Contexto	Influência do contexto político
Divisão do trabalho	Divisão do trabalho e tomadores de decisão entre equipes distintas de uma mesma instituição	Presença de instabilidades gerais (ex: desastres ambientais, eventos de pandemia, fusões entre empresas...)
		Fragmentação das atividades, responsabilidades e aprovações no processo de compra
		Fragmentação das atividades, responsabilidades e aprovações no processo de contratação de pessoal
		Fragmentação das atividades de análise e aprovação do projeto entre instâncias de uma mesma instituição
	Divisão do trabalho e tomadores de decisão entre instituições diferentes que compõem o projeto	Atividades sem prazo limite e sem prejuízos para os envolvidos caso sua execução se dê de forma deficiente
		Dificuldade de convergir negociações com várias instituições que possuem interesses, nível de envolvimento e comprometimento distinto
		Tramitações sem prazo limite e sem prejuízos para os envolvidos caso sua execução se dê de forma deficiente
		Burocracias e tramitações específicas para cada instituição envolvida
Gestão do projeto	Ferramentas gerenciais utilizadas	Contratação de serviços de terceiros que não estão igualmente comprometidos com o projeto
		Gestão do conhecimento
	Riscos e criticidades mapeadas	Gestão da comunicação entre os envolvidos
		Complexidade na retenção de pessoal qualificado/background (turnover)
		Manter a infraestrutura operacional
		Entendimento e nível de engajamento da empresa parceira com o projeto
Compatibilidade entre escopo e orçamento disponível e negociações envolvendo diferentes interesses		
Compatibilidade entre escopo e duração prevista		
Conflitos de interesse na alocação dos recursos financeiros do projeto		
Gestão de pessoas com backgrounds e experiências distintas		

Fonte: A autora (2023).

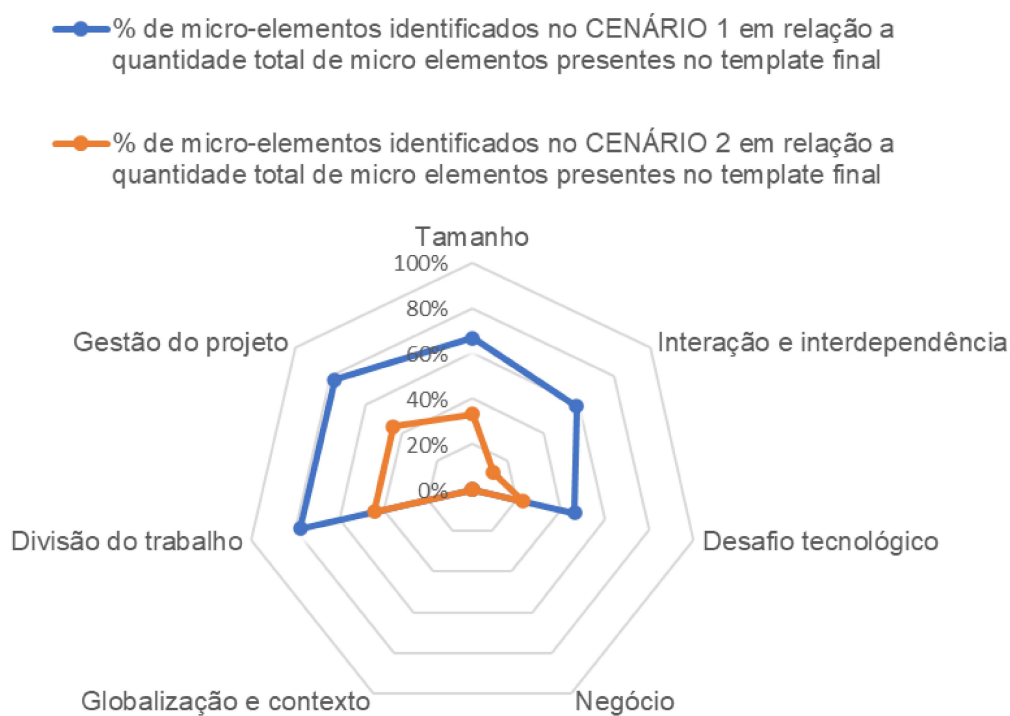
O Quadro 17, elaborado com base nas marcações feitas nos Quadro 15 e Quadro 16, compila os dados coletados para a manifestação dos elementos de complexidade em cada um dos cenários. Este quadro foi a base para a geração do gráfico de radar presente na Figura 24, que mostra de forma mais visual a comparação entre a potencial complexidade presente no cenário 1 e cenário 2.

Quadro 17: Análise de complexidade do projeto de acordo com a forma de inclusão do Grupo C

Macro-elemento de complexidade	Qtde de micro-elementos de complexidade identificados para cada macro-elemento no template final - REFERÊNCIA	REFERÊNCIA	Qtde de micro-elementos de complexidade identificados no CENÁRIO 1 (Inclusão como participante do projeto)	% de micro-elementos identificados no CENÁRIO 1 em relação a quantidade total de micro elementos presentes no template final	Qtde de micro-elementos de complexidade identificados no CENÁRIO 2 (Inclusão como prestador de serviços)	% de micro-elementos identificados no CENÁRIO 2 em relação a quantidade total de micro elementos presentes no template final
Tamanho	9	100%	6	67%	3	33%
Interação e interdependência	17	100%	10	59%	2	12%
Desafio tecnológico	13	100%	6	46%	3	23%
Negócio	3	100%	0	0%	0	0%
Globalização e contexto	3	100%	0	0%	0	0%
Divisão do trabalho	9	100%	7	78%	4	44%
Gestão do projeto	9	100%	7	78%	4	44%

Fonte: A autora (2023).

Figura 24: Gráfico de radar que ilustra de forma comparativa a potencial complexidade do projeto de acordo com as duas possibilidades de inclusão do Grupo C



Fonte: A autora (2023).

O gráfico de radar torna ainda mais fácil visualizar de forma macro a diferença das complexidades nos dois cenários distintos. Tal gráfico pode ser feito a partir da simples alteração dos valores contidos nas colunas quatro e seis da Figura 27.

Facilitar este tipo de análise crítica, de forma que esta possa ser feita de modo ágil, mas ao mesmo tempo de forma robusta e bem embasada tecnicamente, é o que se espera para a utilização do *template* de elementos de complexidade. Com isso, a presente tese alcança seu objetivo de contribuir com o desenvolvimento e/ou aprimoramento de tecnologias gerenciais de apoio que sejam adequadas à realidade de projetos de PD&I em NT. Pois a utilização deste tipo de tecnologia gerencial gera benefícios ao projeto analisado, por mitigar a presença de dificuldades passíveis de ser tratadas de forma estratégica e sistemática.

- *Utilização do template pelos dos financiadores de projetos de NT*

A análise da CP pode oferecer contribuições significativas não apenas aos gestores de projetos, mas também aos financiadores desses desenvolvimentos tecnológicos e outros atores do SNI. Eles podem, por exemplo, estudar e definir quais são as complexidades esperadas para um determinado tipo de projeto a ser financiado por um órgão de fomento ou empresa. Diante desta análise, os *stakeholders* podem julgar qual estratégia de aporte de recursos seria a mais adequada para o atingimento dos resultados almejados (ex: alocação de recursos públicos, privados ou mistos; realizar o desenvolvimento envolvendo na iniciativa pública, privada ou junção de ambos; ser mandatória ou não a participação de uma fundação de apoio ou possibilidade de utilização de um “Cartão Pesquisa”, entre diversos outros).

Dependendo da estratégia adotada, ficará claro quais as implicações desta para a redução ou aumento da presença de elementos de complexidades no projeto. Ainda, os *stakeholders* poderão utilizar de tais *inputs* para determinar as diretrizes, métodos, técnicas, ferramentas, abordagens mais promissoras para o acompanhamento do projeto em questão. Bem como as atreladas à gestão e coordenação do projeto, que poderão ser moldadas para lidarem com as complexidades presentes da melhor forma possível.

A seguir será apresentado um exemplo de análise simples, mas importante, que poderia feita rapidamente durante a construção de um edital: Caso o objetivo do edital

seja integrar grupos de pesquisa (com competências complementares e pertencentes a diferentes universidades) com empresas interessadas no desenvolvimento tecnológico resultante da integração dos conhecimentos entre tais grupos, entende-se que as complexidades no que tange a, pelo menos, os seguintes elementos seria consideravelmente aumentada (Quadro 18) :

Quadro 18: Elementos de complexidade mapeados com base no cenário hipotético apresentado

Elementos de complexidade	
Macro	Meso/Micro (simplificado)
Tamanho	<i>Stakeholders</i> /instituições (envolvimento de diferentes universidades e empresa parceira)
	Pessoas (execução técnica, coordenação, gestão, acompanhamento)
Interação e interdependência	Tramitação/aprovação do projeto (dentro de diferentes universidades, empresa, fundação de apoio e instituição financiadora do projeto)
	Documentações do projeto (negociação do instrumento jurídico e plano de trabalho de forma a levar em consideração demandas das diversas instituições envolvidas no projeto)
	A atividades e/ou contrapartidas sob responsabilidade da empresa parceira
	Entre a equipe executora do projeto (dispersa entre grupos de diferentes universidades)
Desafio tecnológico	Retenção de pessoal qualificado e com <i>background</i> na área alocados diferentes universidades
	<i>Know-how</i> dos grupos na área de nanotecnologia (conciliar e conseguir convergir diferentes visões sobre o planejamento, execução e gestão do projeto)
	Histórico da empresa parceira com PD&I externo e nanotecnologia
	Caracterização e controle de qualidade (análises distribuídas entre vários grupos, o que requer o estabelecimento de confiança sobre resultados obtidos por cada um deles)
Divisão do trabalho	Divisão do trabalho e número de tomadores de decisão entre instituições diferentes que compõem o projeto
Gestão do projeto	Ferramentas gerenciais utilizadas (para a gestão do dia a dia, gestão do cronograma, gestão do conhecimento etc.)
	Riscos e criticidades mapeadas (potenciais conflitos na alocação dos recursos financeiros do projeto; potenciais conflitos entre as lideranças e diferentes equipes que compõem o projeto; nível de engajamento, comprometimento e dependência entre os trabalhos desempenhados; dependência de infraestruturas disponibilizadas pelas diferentes instituições)

Fonte: A autora (2013)

Com base nas reflexões obtidas a partir da elaboração de tal quadro, os responsáveis por elaborar este edital poderiam pensar criticamente sobre diversos aspectos, como: A integração entre as instituições é algo estratégico, mas, qual é o melhor custo vs. benefício envolvido nessa integração? Quais são os requisitos/contribuições/papel para que seja, de fato, interessante que uma instituição faça parte do projeto? Ter uma instituição como prestadora de serviços em um termo de cooperação também pode ser visto como um indício da integração almejada?

Um projeto que envolve diferentes instituições demanda um maior nível de articulação entre as interfaces para garantir a comunicação adequada, alinhamentos, compartilhamento de conhecimentos, transparência em relação a aspectos financeiros entre outros. Diante disso, aplicam-se reflexões como: Quem são os responsáveis por operacionalizar isso? O(s) coordenador(es) de cada grupo? Um coordenador geral? A fundação de apoio? Seria interessante ter um gestor neste projeto que pudesse intermediar e facilitar tais interfaces? O edital que está sendo elaborado permite tal contratação? As propostas que demonstrarem robustez em relação à “como” pretendem fazer a gestão desses elementos de complexidade serão mais bem avaliadas?

Estes são alguns exemplos, não exaustivos, de aspectos que poderiam ser discutidos pelos financiadores de projetos diante do contexto apresentado e que, poderiam agregar valor à lapidação de um edital para a contratação de projetos de PD&I em NT. Com base nesta análise crítica, a estrutura do edital, seus critérios de seleção, bem como o corpo de avaliadores envolvidos neste processo, poderiam estar mais aptos a selecionar projetos que possuam maiores chances de sucesso, por estarem mais preparados para lidar com as potenciais dificuldades que serão encontradas durante a execução.

Além de contribuir nas etapas de construção de editais e seleção de projetos, o *template* para análise de complexidades poderia também auxiliar no acompanhamento dos projetos a partir sua utilização como ferramenta gerencial de apoio em *check points*, auditorias, reuniões de acompanhamento entre outras formas utilizados pelos financiadores para supervisionar/assistir/avaliar os desenvolvimentos de PD&I em NT.

Os financiadores destes projetos poderiam utilizá-lo como apoio nestes encontros intermediários para nortear o entendimento e fazer uma análise crítica sobre as dificuldades que estão sendo enfrentadas na execução do projeto. Além disso, eles poderiam utilizar os *insights* provenientes deste contato com a coordenação e gestão do projeto para sugerir ações e/ou utilizar de sua autoridade como instituição financiadora para contribuir com a resolução de problemas como, por exemplo, os burocráticos.

Vale ressaltar que problemas burocráticos foram claramente identificados como fortes fontes de CP, por contribuírem para atrasos significativos nos cronogramas técnicos, devido à demora na aprovação de remanejamentos, realização de aquisições, prestação de contas, liberação de parcelas, entre outros. Com base no conteúdo das entrevistas e na experiência prática da autora desta tese, alguns destes desafios comumente enfrentados pela gestão e coordenação do projeto podem ser resolvidos de forma mais ágil quando há o apoio/mobilização/intervenção de alguém da instituição financiadora que tenha interesse direto no sucesso do projeto.

6.3 Implicações do estudo

As implicações do presente estudo serão separadas em três tópicos, com o objetivo de elucidar as implicações teóricas (tópico 6.3.1) e as implicações práticas para diferentes atores (tópico 6.3.2 – para gestores de projetos e tópico 6.3.3 – para financiadores de iniciativas na área de NT).

6.3.1 Implicações para as literaturas de NT, gestão de projetos e flexible pattern matching

Diante das grandes expectativas sobre a comercialização de soluções nanotecnológicas preconizadas pelo *hype* da NT, o presente estudo visa contribuir com o desenvolvimento de conteúdo para uma literatura que reconhece as peculiaridades dos desenvolvimentos desta área emergente (FERNANDES; REIS; SERIO, 2017; MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012; MAINE; SEEGOPAUL, 2016; SHEA, 2005; TSUZUKI, 2016; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019) e os desafios relacionados à comercialização das NTs (AITHAL; AITHAL, 2016a, 2016b, 2016c; BELCHER et al., 2013; MAINE, 2013a, 2000; MAINE; LUBIK; GARNSEY, 2012; MAINE; SEEGOPAUL, 2016; NASERI; DAVOODI, 2011; REISS; HJELT;

FERRARI, 2017; TSUZUKI, 2016), mas carece de uma discussão sistemática sobre aspectos de gestão dos desenvolvimentos tecnológicos. Isto foi feito a partir da análise do que há entre as grandes expectativas existentes e a inserção dos produtos no mercado: anos de desenvolvimento de projetos complexos de PD&I.

Para tal, foi feita uma comparação, à luz da literatura de CP, entre o que é visto como desafio/complexidade e o que acontece na prática na execução destes projetos de NT. Isso gerou *insights* interessantes sobre diversos aspectos que não foram encontrados nas literaturas estudadas (NT e CP), estão presentes no dia a dia da execução dos projetos analisados e são considerados pelas lideranças como complexidades que dificultam a elaboração e/ou o desenvolvimento do projeto, são eles:

- (i) desafios na negociação do plano de trabalho do projeto entre a equipe técnica da empresa financiadora e o grupo de pesquisa da universidade;
- (ii) desafios na negociação entre empresa, universidade e fundação de apoio, do instrumento jurídico que formaliza o projeto de PD&I considerando os interesses distintos as instituições envolvidas;
- (iii) quantidade de instâncias pelas quais o projeto (plano de trabalho e instrumento jurídico, além das diversas documentações que são agregadas ao longo do processo) precisa tramitar para ser contratado (o que inclui diversas instâncias em cada uma das instituições envolvidas);
- (iv) quantidade de pessoas envolvidas nas aquisições e contratações do projeto;
- (v) quantidade de instâncias e níveis hierárquicos que as aquisições e contratações precisam passar para serem implementados (inclusive envolvendo diferentes instituições, como empresa parceira, instituição financiadora e fundação de apoio);
- (vi) dificuldades das empresas financiadoras em fornecer amostras próprias de materiais críticos para o início e/ou andamento da pesquisa;
- (vii) dificuldades de ter acesso ao ambiente de campo das empresas financiadoras para a realização de testes;
- (viii) desafios envolvendo o engajamento da empresa financiadora para cumprir com as atividades e responsabilidades presentes no cronograma do projeto

- e que estão sob sua responsabilidade (ex: fornecer acesso a infraestrutura pré-existente para a preparação de corpos de prova, realização de análises em laboratório próprio e/ou em campo e fornecimento de *feedback* para os pesquisadores, analisar e aprovar relatórios e pedidos de remanejamento, viabilizar a liberação de parcelas previstas no orçamento do projeto etc.);
- (ix) dependência e dificuldade de retenção da equipe executora do projeto;
 - (x) dificuldades para gerir o conhecimento obtido ao longo do desenvolvimento tecnológico (que envolve diversos projetos) e transmitir para os novos entrantes;
 - (xi) dependência de profissionais técnicos que atendem simultaneamente a demandas de diferentes projetos e que atrasam a liberação de resultados críticos para o projeto, afetando assim seu progresso;
 - (xii) dificuldades associadas ao *know-how* (que extrapolam aspectos técnicos) para escrever, captar, executar e gerir um projeto de PD&I em NT;
 - (xiii) questionamentos sobre a confiabilidade dos resultados das caracterizações;
 - (xiv) atividades de tramitação e de apoio ao projeto (ex: análise do projeto por diversas instâncias da universidade e empresa, processo de compras, aprovação de remanejamentos etc.) sem prazo limite e sem prejuízos para os envolvidos caso sua execução se dê de forma deficiente/demore;
 - (xv) falta de comprometimento de instituições contratadas como prestadoras de serviços no projeto;
 - (xvi) dificuldades em obter recursos nos projetos de PD&I para manter a infraestrutura de pesquisa e de suporte operacional (ex: desde a manutenção de equipamentos laboratoriais até elevadores do prédio no qual é executado o projeto, que precisam de estar operacionais para, por exemplo, viabilizar acessibilidade da equipe e transporte de resíduos com segurança) e
 - (xvii) dificuldade de prever no plano de trabalho e repassar (insegurança jurídica) durante a execução do projeto recursos financeiros de um projeto para outras instâncias da universidade (ex: contrapartida financeira para um departamento).

A identificação de tais elementos de complexidade no estudo de campo tem potencial de contribuir para a literatura na área de gestão de projetos, uma vez que autores da área já reconhecem que os projetos de NT possuem particularidades (FRANCO, 2023; MESHALKIN; STOYANOVA; DLI, 2012; SHEA, 2005; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019), mas ainda não mapearam diversas delas apresentadas nesta tese. Portanto, a identificação de tais complexidades em projetos de PD&I em NT pode auxiliar na discussão e desenvolvimento de abordagens para a gestão de projetos complexos adaptadas a projetos de NT, como as de Franco (2023) e Jena e Das (2023).

Ainda, no que tange a rica literatura de CP, mas generalista, esta precisou de ser estudada considerando um foco específico, tal como o estudo da complexidade em projetos de NT. Estudos recentes sinalizam que desafios associados a projetos de pesquisa complexos ainda têm recebido atenção limitada por parte da literatura (DE REZENDE; BLACKWELL; GONÇALVES, 2018; FOSSUM et al., 2022; FRANCO, 2023; ZHIDEBEKKYZY; KUPESHOVA; YESMURZAYEVA, 2019). A presente tese coletou dados de 14 projetos de PD&I de NT, financiados por empresas de diferentes setores industriais, de forma a mapear os desafios enfrentados em sua execução.

Isto irá agregar à literatura da área pois, tal estudo resultou em um instrumento de análise para diagnóstico e prognóstico dos projetos: o *template* de elementos de complexidade. Este instrumento contribuirá para uma demanda sinalizada por Kim e Wilemon (2003) e que, com base nas bibliografias estudadas, aparentemente não foi suprida: a necessidade de estudos que analisam a complexidade durante a execução dos projetos (ao invés de abordagens retrospectivas). Ou seja, a presente fez essa análise durante a execução de diversos projetos e, com base nisso e na literatura, propôs um instrumento próprio para análise sistemática destes desenvolvimentos, que pode ser utilizado não só durante a execução dos projetos, mas também antes de iniciá-los e depois de seu término.

Por fim, como as CP são vistas como uma variável-chave que impacta em muitas decisões e podem afetar e/ou influenciar fortemente a gestão dos projetos e seu sucesso (BAKHSHI; IRELAND; GOROD, 2016; GERALDI; MAYLOR; WILLIAMS, 2011; KAUFMANN; KOCK, 2022), o estudo realizado sobre CP de NT ajudará a robustecer o conhecimento sobre as características próprias destes

desenvolvimentos. De modo a elucidar quais fontes de complexidades podem impactar o andamento destes projetos e que potencialmente contribuem para que as expectativas de comercialização de produtos nanotecnológicos não sejam alcançadas.

No que tange a abordagem metodológica utilizada, o *flexible pattern matching* (BOUNCKEN et al., 2021; BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021), metodologistas e especialistas na área veem que o processo de desenvolvimento de novas teorias a partir da adoção desta estratégia de pesquisa ainda é algo que está em construção no meio acadêmico. Portanto, a combinação dela, com o método para estruturação de dados empíricos de Corley e Gioia (2004) e a adoção dos critérios de credibilidade, transferibilidade, confiabilidade e confirmabilidade para garantir a qualidade da pesquisa qualitativa (LINCOLN; GUBA, 1985), constitui como uma contribuição para o crescente número de estudos interessados em utilizar abordagens metodológicas flexíveis (que combinam indução com dedução).

6.3.2 Implicações para gestores de projetos na área de NT

Para gestores de projetos de NT a análise da complexidade dos projetos a partir do *template* de elementos de complexidade pode ser útil tanto na elaboração quanto na gestão do projeto. Durante a concepção dos projetos os gestores podem utilizar o *template* para a realização de uma análise prognóstica das complexidades potencialmente influentes no andamento do projeto, de forma a evitar que ocorram, no decorrer de sua execução, situações futuras indesejadas (vide exemplo no tópico 6.2.3).

Já na gestão de projetos complexos de NT, os gestores podem utilizar o *template* para identificar, analisar, diagnosticar e lidar com situações nas quais há a influência de complexidades que, se não tratadas, podem reduzir as chances de sucesso do projeto e, como consequência, da comercialização de produtos nanotecnológicos.

Com o objetivo de ilustrar como a análise de CP de NT pode ser útil para na gestão do projeto, a seguir serão apresentados dois exemplos de desafios associados a elementos de complexidade (identificados em *itálico*), que o gestor/coordenador parceira pode se deparar no dia a dia da execução do projeto. Em seguida, serão apresentadas algumas sugestões de estratégias para lidar com estes desafios, que

tem como base o reconhecimento de outros elementos de complexidade mapeados no *template*.

- *Desafio: Compreensão dos desafios técnicos particulares desta área*

A NT envolve sistemas em escala nanométrica, nos quais *as propriedades e comportamentos da matéria podem ser muito diferentes daquelas em escalas maiores*. Isso faz com que haja *forte influência da estrutura da matéria no processo de desenvolvimento de um produto*. Para lidar com tais desenvolvimentos, a literatura evidencia a importância de uma equipe multidisciplinar formada por pesquisadores com competências técnicas em áreas complementares.

O estudo da complexidade nestes projetos pode ajudar coordenadores e gestores de projetos a traçar estratégias para lidar com os desafios técnicos enfrentados no dia a dia. Como ponto de partida, tem-se o reconhecimento da importância dos seguintes elementos de complexidade para a execução técnica dos projetos: (i) *Know-how (da universidade) na área de NT*; (ii) *Contratação e retenção de pessoal qualificado e com background em desenvolvimentos com nanomateriais*; (iii) *Know-how para escrever uma proposta de projeto em NT, executar e gerir*; (iv) *Desafio de aumentar a escala e manter os resultados/melhorias obtidas em menor escala*; (v) *Confiabilidade dos resultados das caracterizações*, entre outros.

Diante dos desafios técnicos particulares desta área e da importância dos elementos de complexidade evidenciados de (i) a (v), são potenciais estratégias de atuação que o gestor e coordenador do projeto podem adotar para lidar com tais complexidades: a) mapear e priorizar a realização de parcerias em projetos de PD&I em NT com grupos universitários com histórico robusto na realização de projetos nesta área; b) procurar valorizar e manter profissionais na equipe do projeto que tenham experiência técnica de anos em NT; c) promover capacitações para novos membros da equipe executora do projeto no que tange aos desafios convencionalmente enfrentados por projetos de NT durante o avanço da maturidade tecnológica dos desenvolvimentos; d) contratar profissionais que possuam experiência em *scale-up* de produção com nanomateriais; e) promover capacitações para técnicos responsáveis pela operação de equipamentos de caracterização, bem como estabelecer procedimentos operacionais padrão e protocolos que auxiliem estes a identificarem potenciais inconsistências nas análises realizadas, entre outros.

- *Desafio: Ausência (ou pouco) histórico da empresa parceira com PD&I externo e NT*

A complexidade técnica em uma área emergente como a NT pode dificultar a eficiência da comunicação entre equipes de projetos e partes interessadas (como empresas e agentes públicos financiadores). Saber lidar com essa situação está intrinsecamente relacionado à capacidade de garantir a continuidade do financiamento de projetos ao longo dos anos, para viabilizar a inserção de um produto nanotecnológico no mercado. A gestão da complexidade nesses relacionamentos é crucial para o sucesso dos projetos pois, conforme identificado no presente estudo, os desenvolvimentos tecnológicos são marcados por grande necessidade de interação e interdependência entre os envolvidos tanto na parte técnica quanto na gerencial.

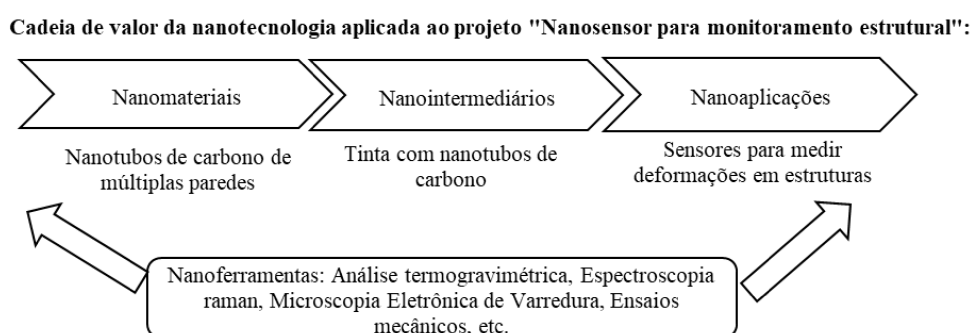
Em decorrência disto, o *conhecimento/experiência da empresa financiadora com projetos de PD&I e, em especial, de PD&I em NT, pode possuir grande influência nas ações desta em relação ao projeto*. Inclusive, a *compreensão de que desenvolvimentos em NT convencionalmente demandam o estabelecimento de vários projetos para avançar do TRL1 ao TRL9*, é uma das complexidades que afeta as expectativas da empresa e, pode fazer toda a diferença no planejamento de médio-longo prazo que se tem para a incorporação de um produto nanotecnológico no mercado.

Neste sentido, o estudo da complexidade pode ajudar os gestores e coordenadores de projeto a reconhecer e desenvolver estratégias de comunicação diferenciadas. Estas devem contribuir para o melhor entendimento e uniformização dos conhecimentos entre as partes e, como consequência, o estabelecimento de uma comunicação mais eficaz e benéfica para que o desenvolvimento tecnológico vá rumo a um produto comercial.

São exemplos de estratégias que poderiam ser utilizadas para promover a melhor interação entre os envolvidos: a) reconhecer a necessidade de capacitar minimamente a empresa parceira sobre as peculiaridades do desenvolvimento tecnológico nesta área (ex: explicar como o projeto em questão está inserido em uma cadeia de valor complexa como a NT, Figura 25); b) tentar tangibilizar o que são os nanomateriais

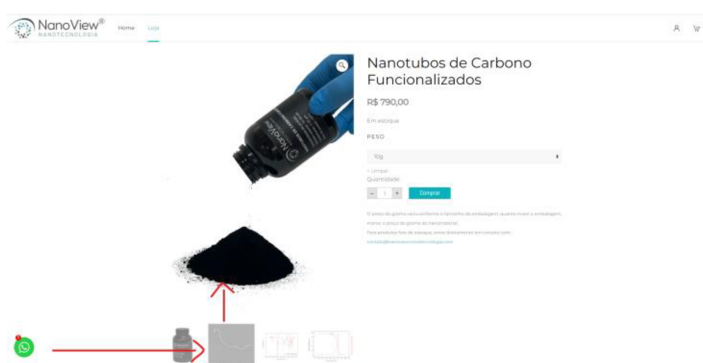
mostrando-os fisicamente (ex: Figura 26) e comparando-os com objetos, elementos amplamente conhecidos (ex: Figura 27); c) adotar estratégias de apresentação de resultados mais didáticas, utilizando de fotos e vídeos ilustrativos (ex: Figura 28⁶), bem como protótipos que demonstrem (mesmo que de forma superficial) os fenômenos estudados e os resultados obtidos (Figura 29⁷), d) utilização de abordagens híbridas na gestão dos projetos de NT (ex: Franco (2023)); e) explicar para o parceiro o que envolve o avanço da maturidade tecnológica de um desenvolvimento em NT e como isso está associado ao processo de desenvolvimento de tecnologias e produtos com nanomateriais (ex: Resende et al. (2017)).

Figura 25: Explicação de como um desenvolvimento tecnológico está localizado dentro da cadeia de valor da nanotecnologia



Fonte: A autora (2023)

Figura 26: Imagem do e-commerce da NanoView Nanotecnologia que mostra que o "pó preto" corresponde a milhares de nanotubos funcionalizados e, ao mesmo tempo, disponibiliza uma imagem de microscopia eletrônica de varredura como um zoom do que o cliente está vendo

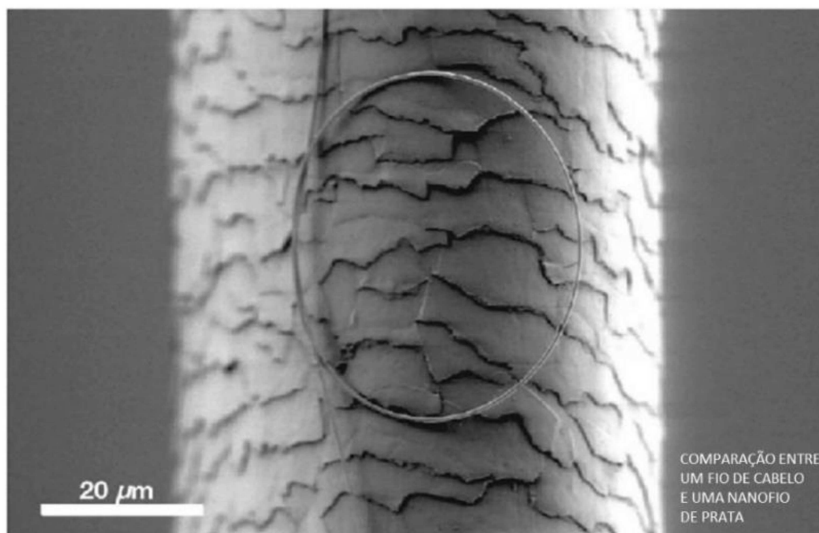


Fonte: NanoView Nanotecnologia (2023)

⁶ Veja o vídeo no link: <https://youtube.com/shorts/mOPUI7IEtGU>

⁷ Veja o vídeo no link: <https://youtube.com/shorts/saq58j0cP5U?feature=share>

Figura 27: Comparação entre um fio de cabelo e um nanofio de prata



Fonte: Adaptado de NanoView Nanotecnologia (2023)

Figura 28: Print do vídeo que ilustra uma das etapas do processo de scale-up de produção dos sensores nanoestruturados



Fonte: NanoView Nanotecnologia (2023)

Figura 29: Print do vídeo ilustrativo do protótipo da aplicação de um sensor nanoestruturado em um braço robótico



Fonte: NanoView Nanotecnologia (2023)

A análise dos dois exemplos de desafios abordados acima a partir da utilização do *template* de complexidade, abre caminho para o desenvolvimento de uma ferramenta complementar ao *template*: proposição de cenários de complexidade e potenciais ações para lidar com cada cenário.

Algo semelhante já foi feito pelo PMI (2014), que dedicou um capítulo do seu guia prático voltado para a gestão de projetos complexos, para a apresentação de cenários que gestores de projetos complexos poderiam encontrar, e quais seriam as ações que poderiam potencialmente ser consideradas por eles para a solução destas complexidades, Figura 30⁸.

Isso não apenas pode ser particularmente interessante para gestores que possuem pouca experiência na área, mas também pode ser uma ferramenta valiosa para gestores experientes ao enfrentarem situações complexas ainda não vivenciadas.

⁸ A proposta do PMI (2014) foi sucintamente explicitada neste parágrafo, mas ela engloba também a resposta de sim ou não (por parte do gestor do projeto), para algumas “questões de avaliação”. Estas questões contribuem para caracterizar o cenário em questão e, como consequência, para direcionar da melhor forma possível como gerir as complexidades associadas a ele.

Figura 30: Cenários de complexidade e potenciais ações a se considerar

Cenário de Complexidade 1	Os requisitos do programa ou projeto mudam frequentemente ou não podem ser claramente definidos devido a informações conflitantes recebidas de diversas partes interessadas.
Pergunta de avaliação aplicável	Respostas negativas para as questões 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 18, 21, 22, 25, 28, 29, 30, 34, 35, 36, 37, 38, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47
<p>Possíveis ações para considerações:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Atribuir recursos para verificar as informações recebidas e estabelecer uma base objetiva para a tomada de decisões. • Equilibrar e negociar os requisitos declarados pelos clientes com base nas recomendações dos especialistas do programa ou da equipe do projeto, a fim de estabilizar os requisitos. • Examinar as alterações nos requisitos em busca de implicações (por exemplo, benefícios, impacto em outros requisitos) e tomar medidas imediatas para ajustar o programa ou projeto conforme necessário. • Implementar o programa apropriado ou a estrutura organizacional do projeto para facilitar as comunicações. • Desenvolva e mantenha um site on-line para compartilhar com todas as principais partes interessadas para permitir a colaboração e o rastreamento da aprovação de requisitos. 	

Fonte: Traduzido de PMI (2014)

6.3.3 Implicações para os financiadores de iniciativas na área de NT

Diante de múltiplas possibilidades, propostas de aplicação e direções possíveis para desenvolvimentos em NT, a tarefa de atribuir valor, maturidade, potencial de impacto ou mesmo viabilidades gerais de projetos propostos neste campo torna-se essencial para pavimentar um futuro de inovações baseadas em nanomateriais. Isto porque, a forma de alocação dos recursos investidos em projetos de NT contribui para moldar significativamente a inovação nessa área (FOLEY; WIEK, 2013).

O desafio na avaliação dos projetos, identificação dos mais promissores e factíveis na área de NT, é compartilhado por agentes de decisão e gestores em vários níveis: desde proponentes de iniciativas partindo das universidades, passando por empresas que investem esforços no setor até agentes da iniciativa pública que fomentam tais desenvolvimentos. Neste sentido, o presente estudo aumenta o conhecimento sobre os desenvolvimentos em NT, a partir do mapeamento e análise de suas características singulares em relação a outras áreas.

No que diz respeito às instituições financiadoras de projetos PD&I no campo da NT (como agências de fomento e empresas), a análise da CP pode contribuir: (i) na elaboração de editais que prospectam projetos nesta área (ver exemplo do tópico 6.2.3); (ii) no diagnóstico e identificação de oportunidades de melhorias na análise e avaliação de projetos; (iii) durante a tomada de decisões de alocação de recursos em projetos; (iv) no acompanhamento dos projetos de forma customizada e focado na

evolução do desenvolvimento de produtos nanotecnológicos, auxiliando as lideranças técnicas a superar os desafios para perpassar o “Vale da Morte” e fornecendo suporte à comercialização; (v) na análise crítica e obtenção de aprendizados a partir de desenvolvimentos tecnológicos em que os objetivos inicialmente vislumbrados não foram alcançados dentro do seu período de execução do projeto; (vi) no estudo e escolha de estratégias de assistência que iniciativas na área de NT devem receber, de modo alinhado à atuação de diversos atores do SNI que possam potencializar o alcance dos resultados almejados.

Além das formas de contribuição retratadas acima, esta tese identificou sinergias significativas entre as literaturas estudadas e estratégia amplamente adotada para a avaliação de projetos na área de NT: a escala TRL. Conforme reportado na revisão de literatura e no APÊNDICE 1, a escala TRL tem como limitação o fato de ser uma abordagem linear. Por outro lado, cinco dos sete entrevistados evidenciaram que o processo de desenvolvimento de projetos de PD&I em NT não é linear, mas sim conta com pivotagens em relação às rotas inicialmente adotadas.

Esta constatação pode ser considerada como mais um indício de que as peculiaridades dos desenvolvimentos em NT devem ser consideradas durante a avaliação e acompanhamento do progresso de projetos nesta área. Pois uma limitação desta escala (o fato dela ser linear) amplamente utilizada para a avaliação destes projetos não leva em consideração este elemento de complexidade (projetos de NT não são lineares) visto nas entrevistas e na literatura como muito relevante e possui alto impacto na execução de projetos de NT.

Um exemplo de como essas sinergias poderiam ser aproveitadas pelos financiadores de projetos de PD&I em NT, seria a realização de uma análise dos elementos de complexidade presentes em um determinado projeto, caso o projeto não alcance o TRL_{final} proposto no seu plano de trabalho. Após a identificação de que um projeto em questão não alcançou o TRL esperado/previsto no plano de trabalho, os financiadores poderiam utilizar o *template* de elementos de complexidade para analisar quais foram as complexidades enfrentadas na execução daquele projeto, e que potencialmente contribuíram para o não alcance do resultado/TRL acordado. Esta análise poderia ser feita, por exemplo, inicialmente pelo financiador e confrontada com a visão do

coordenador do projeto, para que ele também possa expor suas considerações sobre as complexidades enfrentadas no dia a dia da execução de um projeto de NT.

A realização da análise crítica desses casos de insucesso a partir da utilização do *template* de elementos de complexidade poderia gerar, ao longo do tempo, uma base de dados com informações valiosas sobre aspectos que coordenadores de projetos de PD&I, financiadores e instituições de fomento deveriam se atentar ao avaliar, financiar, executar e gerir projetos na área de NT.

Pode-se assumir que a literatura corrobora que tais informações seriam de grande valia pois, segundo o PMI (2014), o ponto de partida para lidar com a CP é compreender como ela é vivenciada, suas causas e antecipação de seus efeitos. Segundo Kim e Wilemon (2003), as organizações que possuem conhecimento sobre a natureza da complexidade com que lidam podem desenvolver a capacidade de gerenciá-la adequadamente e mitigar seus efeitos negativos. Ou seja, entender em profundidade o porquê um projeto de desenvolvimento tecnológico não alcançou a maturidade/objetivo esperado pode ser a chave para aprender com isso e propor ações preventivas ou corretivas para que os desafios enfrentados por outros projetos na área sejam superados e, como consequência, contribuir para que os desenvolvimentos nanotecnológicos sejam impulsionados rumo a comercialização.

7 CONCLUSÃO

O presente estudo alcançou seu objetivo principal de caracterizar a Complexidade em Projetos (CP) de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) na área de Nanotecnologia (NT). Isto foi feito utilizando como estratégia metodológica a abordagem de *flexible pattern matching*, que contrapõe complexidades potenciais previamente identificadas na literatura com dados reais obtidos a partir de projetos do CTNano/UFMG.

Como resultado, tem-se um *template* com os elementos de complexidade mais significativos em projetos na área de NT. Ele conta com sete macro-elementos de complexidade (tamanho, interação e interdependência, desafio tecnológico, negócio, globalização e contexto, divisão do trabalho e gestão do projeto) e 56 micro-elementos, que juntos caracterizam a complexidade em projetos de PD&I em NT.

Este *template* se propõe a ser um instrumento de análise para diagnóstico e prognóstico de projetos de PD&I em NT, que auxilia a elucidar quais complexidades podem impactar o andamento destes projetos e que, se não tratadas, podem contribuir para que as expectativas de comercialização dos produtos nanotecnológicos não se concretizem.

A partir dele, esta tese contribui com a literatura de NT, que carece de discussões sistemáticas de gestão, e enriquece o debate rico, porém generalista, sobre CP ao desenvolver um *template* de referência que dialoga com complexidades reais de um contexto emergente e promissor para estudos de gestão. Além disso, agrega à literatura de CP o estudo de casos práticos para que a caracterização da complexidade possa ser utilizada na proposição de modelos e estruturas que auxiliem a gestão de projetos complexos.

Contudo, este estudo também possui limitações. Os dados de campo foram obtidos a partir da análise de 14 projetos executados por uma mesma instituição, o CTNano/UFMG, em parceria com empresas de diversos setores (petróleo e gás, mineração, refratários, papel e celulose, metal mecânico e aviação). Centros de pesquisa com um foco específico, como é o CTNano/UFMG para a área de NT, são essenciais para a promoção de inovações a partir da interação com o meio empresarial, devido a sua produção científico-tecnológica em setores estratégicos para o País (MEDEIROS, 2020).

Logo, o estudo feito a partir deste ambiente de campo é válido como ponto de partida para a construção de um *template* que contempla elementos de complexidade significativos em projetos de NT. Entretanto, trata-se de um ambiente específico, em uma posição particular na cadeia de valor, onde se desenvolvem projetos de NT até o TRL 6-7 (sendo que a comercialização das tecnologias fica a cargo de empresas parceiras e/ou *start-ups*), entre outras particularidades.

Portanto, sugere-se a realização de estudos complementares para o aumento da amostragem. Estes poderiam incorporar, por exemplo, diferentes instituições, projetos executados por meio de parcerias internacionais, empresas de outros setores e portes, projetos executados somente por universidades com recursos oriundos de agências de fomento, entre outras possibilidades. Dessa forma, é esperado que sejam identificados outros elementos de complexidade que poderiam agregar valor ao *template* resultante deste estudo.

Além da ampliação da amostragem, sugere-se como estudos futuros o aprimoramento do *template* para a análise complexidade em projetos de PD&I, a partir da inclusão de sugestões de estratégias para lidar com os desafios relacionados a cada um dos elementos de complexidade presentes no *template*. Proposta semelhante foi feita pelo PMI (2014), ao apresentar cenários que gestores de projetos complexos poderiam se deparar, e quais ações poderiam potencialmente ser consideradas por eles para a solução das complexidades identificadas.

Diante disso, acredita-se que a combinação do aumento da amostragem dos projetos estudados com a inclusão de estratégias para lidar com as complexidades mapeadas, contribuirá para o desenvolvimento de um artefato ainda mais robusto para ser utilizado de forma ampla como ferramenta de apoio gerencial para projetos de PD&I em NT. Isto pode ser particularmente interessante para auxiliar profissionais que possuem pouca experiência com desenvolvimentos tecnológicos e de produtos na área. Como também pode ser uma ferramenta valiosa para que profissionais experientes neste ramo recorram a ela ao enfrentar situações complexas que ainda não tenham vivenciado.

No que tange a abordagem metodológica utilizada, o *flexible pattern matching*, esta vem ganhando espaço nos últimos anos e tem sido cada vez mais conhecida por pesquisadores e praticantes. Metodologistas e especialistas na área reconhecem que

o processo de desenvolvimento de novas teorias a partir da adoção desta estratégia de pesquisa ainda está em construção no meio acadêmico. Procurou-se lidar com isto a partir da adoção de abordagens já consolidadas para a estruturação e análise de dados, e trazendo elementos que contribuíssem para a afirmação da confiabilidade e validade da pesquisa.

Neste sentido, a combinação da estratégia metodológica de *flexible pattern matching* (BOUNCKEN et al., 2021; BOUNCKEN; QIU; GARCÍA, 2021), com o método para estruturação de dados empíricos de Corley e Gioia (2004) e a adoção dos critérios de credibilidade, transferibilidade, confiabilidade e confirmabilidade para garantir a qualidade da pesquisa qualitativa (LINCOLN; GUBA, 1985), constitui como contribuição para o crescente número de estudos interessados na utilização de abordagens metodológicas flexíveis (que combinam indução com dedução).

Por fim, conclui-se que o estudo da CP de PD&I no campo da NT pode auxiliar estrategicamente e de múltiplas formas os atores do ecossistema de ciência, tecnologia e inovação. No que diz respeito às instituições financiadoras de projetos PD&I no campo da NT (como agências de fomento e empresas), a análise da CP pode contribuir: (i) na elaboração de editais que prospectam projetos nesta área; (ii) no diagnóstico e identificação de oportunidades de melhorias na análise e avaliação de projetos; (iii) durante a tomada de decisões de alocação de recursos em projetos; (iv) no acompanhamento customizado e focado na evolução do desenvolvimento de produtos nanotecnológicos, auxiliando as lideranças técnicas a superar os desafios para perpassar o “Vale da Morte” e fornecendo suporte à comercialização; (v) na análise crítica e obtenção de aprendizados a partir de desenvolvimentos tecnológicos em que os objetivos inicialmente vislumbrados não foram alcançados dentro do seu período de execução do projeto; (vi) no estudo e escolha de estratégias de assistência que iniciativas na área de NT devem receber, de modo alinhado à atuação de diversos atores do SNI que possam potencializar o alcance dos resultados almejados.

Para gestores de projetos de NT a análise da complexidade destes projetos a partir da utilização do *template* de elementos de complexidade, pode contribuir tanto na elaboração do projeto quanto em sua gestão. Durante a concepção dos projetos os gestores podem utilizar o *template* para a realização de uma análise prognóstica das complexidades potencialmente influentes no andamento do projeto, de forma a evitar que ocorram, no decorrer de sua execução, situações futuras indesejadas. Já na

gestão de projetos complexos de NT, os gestores podem utilizar o *template* para analisar, diagnosticar e lidar com situações nas quais há a influência de complexidades que, se não tratadas, podem reduzir as chances de sucesso do projeto e, como consequência, da comercialização de produtos nanotecnológicos.

Ante ao exposto, espera-se que este estudo contribua com a área de NT, carente de suporte gerencial adaptado a esta realidade, mas extremamente promissora, proporcionando insights valiosos, direcionamentos estratégicos e fundamentos robustos para impulsionar o desenvolvimento e a inovação nesse campo dinâmico e emergente.

REFERÊNCIAS

- ABGI. **TRL: Recursos financeiros por níveis de maturidade tecnológica.** Disponível em: <<https://abgi-brasil.com/trl-recursos-financeiros-por-niveis-de-maturidade-tecnologica/>>.
- ABNT. **NBR ISO 16290: Sistemas espaciais — Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação.** Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <www.abnt.org.br>.
- AHERN, T.; BYRNE, P. J.; LEAVY, B. Developing complex-project capability through dynamic organizational learning. **International Journal of Managing Projects in Business**, v. 7, n. 1, p. 133–143, 2014.
- AHMAD-TAJUDDIN; AZZA, J. Defining Professional Communication Skills for Malaysian Graduates: Evidence analysis using ATLAS.ti. **International Journal of Multidisciplinary Approach and Studies**, v. 2, n. 2, p. 1–22, 2015.
- AITHAL, P. S.; AITHAL, P. S. A review on Anticipated Breakthrough Technologies of 21st Century. **International Journal of Research & Development in Technology and Management Science –Kailash**, v. 21, n. 6, p. 112–133, 2015.
- AITHAL, P. S.; AITHAL, S. Nanotechnology Innovations and Commercialization- Opportunities, Challenges & Reasons for Delay. **International Journal of Engineering and Manufacturing**, v. 6, n. 6, p. 15–25, 2016a.
- AITHAL, P. S.; AITHAL, S. A new model for commercialization of nanotechnology products & services. **International Journal of Computational Research and Development**, v. 1, n. 1, p. 84–93, 2016b.
- AITHAL, S.; AITHAL, S. Business Strategy for Nanotechnology Based Products and Services. **International Journal of Management Sciences and Business Research**, v. 5, n. 4, p. 139–151, 2016c.
- ALVES, O.; GALEMBEC, F.; RIPEL, M. **Resumo Executivo: Nanotecnologia.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://lqes.iqm.unicamp.br/images/publicacoes_teses_livros_resumo_nanotecnologia_resumo_nae.pdf>. Acesso em: 31 maio. 2022.
- ALVESSON, M.; KÄRREMAN, D. Constructing mystery: Empirical matters in theory development. **Academy of Management Review**, v. 32, n. 4, p. 1265–1281, 2007.
- ALVIAL-PALAVICINO, C.; KONRAD, K. The rise of graphene expectations: Anticipatory practices in emergent nanotechnologies. **Futures**, v. 109, p. 192–202, 2019.
- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. **Nanotechnology Safety Resources.** Disponível em: <<https://www.acs.org/about/governance/committees/chemical-safety/publications-resources/nanotechnology-safety-resources.html>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

ANG, C. K.; EMBI, M. A.; YUNUS, M. M. Enhancing the quality of the findings of a longitudinal case study: Reviewing trustworthiness via ATLAS.ti. **Qualitative Report**, v. 21, n. 10, p. 1855–1867, 2016.

AUSTRALIAN RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Commercial Readiness Index for Renewable Energy Sectors**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/au/>>.

BACCARINI, D. The concept of project complexity - A review. **International Journal of Project Management**, v. 14, n. 4, p. 201–204, 1996a.

BACCARINI, D. The concept of project complexity—a review. **International Journal of Project Management**, v. 14, n. 4, p. 201–204, 1 ago. 1996b.

BAGNO, R. B.; SALERNO, M. S.; DA SILVA, D. O. Models with graphical representation for innovation management: a literature review. **R&D Management**, v. 47, n. 4, p. 637–653, set. 2017.

BAINBRIDGE, W. S.; ROCO, M. C. Science and technology convergence: with emphasis for nanotechnology-inspired convergence. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 18, n. 7, 2016.

BAKHSHI, J.; IRELAND, V.; GOROD, A. Clarifying the complexity construct: past present and future. **International Journal of Project Management**, n. 34, p. 1199–1213, 2016.

BAKKE, K. **Technology readiness levels use and understanding**. [s.l: s.n.].

BATES, C. A.; CLAUSEN, C. Engineering Readiness: How the TRL Figure of Merit Coordinates Technology Development. **Engineering Studies**, v. 12, n. 1, p. 9–38, 2020.

BELCHER, C. et al. The Commercialisation of Nanotechnology: The Five Critical Success Factors to a Nanotech-Enabled Whole Product. In: CRC PRESS (Ed.). . **Nanotechnology Commercialization**. 1. ed. [s.l.] Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2013. p. 171–200.

BELLUCCI, F.; VASQUEZ, H.; CONTI, J. **Panorama Tecnológico Grafeno Contexto Brasileiro e sua Demanda por Financiamento**. Rio de Janeiro: [s.n.].

BENNETT, R. P. Commercialization-Friendly Innovation/R&D Model for Superior Exploitation of Nanotechnologies. **Nanotech. L. & Bus.**, n. 5, p. 441, 2008.

BENSLEY, J.; SMITH, C.; BARBER, R. **Harnessing Emergence in Complex Projects: Rethinking Risk, Opportunity & Resilience**. Brisbane: [s.n.].

BERUBE, D. M. **Nano-hype: the truth behind the nanotechnology buzz**. [s.l.] Amherst, 2006.

BEVER, M. ET AL. **The Encyclopedia of Advanced Materials**. Oxford: Elsevier, 1994.

BOREN, M.; CHAN, V.; MUSSO, C. The path to improved returns in materials commercialization. **McKinsey Quarterly**, n. Exhibit 1, p. 1–9, 2012.

BOSCH-REKVELDT, M. et al. Grasping project complexity in large engineering projects: The TOE (Technical, Organizational and Environmental) framework. **International Journal of Project Management**, v. 29, n. 6, p. 728–739, 2011.

BOUNCKEN, R. B. et al. Qualitative research: extending the range with flexible pattern matching. **Review of Managerial Science**, v. 15, n. 2, p. 251–273, 2021.

BOUNCKEN, R. B.; QIU, Y.; GARCÍA, F. J. S. Flexible pattern matching approach: Suggestions for augmenting theory evolution. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 167, n. February, p. 120685, jun. 2021.

BRASIL. **Lei n.º 10.973 - Lei da Inovação**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.973.htm>. Acesso em: 13 nov. 2023.

BRAUNSCHWEIG, C. Nano nonsense. **Venture Capital Journal**, 2003.

BROCKMANN, C.; GIRMSCHIED, G. **Complexity of Megaprojects**. CIB World Building Congress. **Anais...2007**

BUCHNER, G. A. et al. Specifying Technology Readiness Levels for the Chemical Industry. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 58, n. 17, p. 6957–6969, 2019.

CAO, C.; APPELBAUM, R. P.; PARKER, R. “Research is high and the market is far away”: Commercialization of nanotechnology in China. **Technology in Society**, v. 35, n. 1, p. 55–64, 2013.

CARTER, N. et al. The career reasons of nascent entrepreneurs. **Journal of Business Venturing**, v. 18, p. 13–19, 2003.

CERTI. **Guia prático do TRL**. Florianópolis: [s.n.].

CHAIN, V. Competitive Advantages in a Nanotechnology Value Chain. **SEA: Practical Application of Science**, v. III, n. 7 (1/2015), p. 573–579, 2015.

CHAPMAN, R. J. A framework for examining the dimensions and characteristics of complexity inherent within rail megaprojects. **International Journal of Project Management**, v. 34, n. 6, p. 937–956, 2016.

CHEAH, S.; BELLAVITIS, C.; MUSCIO, A. The impact of technology complexity on the financial performance of R&D projects: evidence from Singapore. **The Journal of Technology Transfer**, v. 46, p. 431–458, 2021.

CHESBROUGH, H. Business Model Innovation: Opportunities and Barriers. **Long Range Planning**, v. 43, n. 2–3, p. 354–363, 1 abr. 2010.

CHRISTENSEN, C. M.; MUSSO, C. S.; ANTHONY, S. D. Maximizing the returns from research. **Research and Technology Management**, p. 12–18, 2004.

CLAUSING, D. et al. Technology readiness. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 99, n. 4, p. 52–59, 2010.

COOPER, R. G. Perspective: The stage-gates® idea-to-launch process - Update, what's new, and NexGen systems. **Journal of Product Innovation Management**, v. 25, n. 3, p. 213–232, 2008.

CORBIN, J.; STRAUSS, A. **Basics of Qualitative Research: Techniques and procedures for developing grounded theory**. [s.l: s.n.].

CORLEY, K. G.; GIOIA, D. A. Identity Ambiguity and Change in the Wake of a Corporate Spin-off. **Administrative Science Quarterly**, v. 49, n. 2, p. 173–208, 23 jun. 2004.

CRISTÓBAL, J. R. S. Complexity in Project Management. **Procedia Computer Science**, v. 121, p. 762–766, 2017.

CTIT. **Institucional**. Disponível em: <<http://www.ctit.ufmg.br/>>.

DAO, B. et al. Identifying and Measuring Project Complexity. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 476–482, 2016.

DAU. **Manufacturing Readiness Level**. Disponível em: <<https://www.dau.edu/glossary/Pages/Glossary.aspx#!both%7CM%7C27895>>. Acesso em: 26 fev. 2022.

DE MEYER, A.; LOCH, C. H.; PICH, M. T. Managing Project Uncertainty: From Variation to Chaos. **MIT Sloan Management Review**, p. 60–67, 2002.

DE REZENDE, L. B.; BLACKWELL, P.; GONÇALVES, M. D. P. Research Focuses, Trends, and Major Findings on Project Complexity: A Bibliometric Network Analysis of 50 Years of Project Complexity Research. **Project Management Journal**, v. 49, n. 1, p. 42–56, 2018.

DE VRIES, M. J. Analyzing the complexity of nanotechnology. **Nanotechnology Challenges: Implications for Philosophy, Ethics and Society**, p. 165–179, 1 jan. 2006.

DI SIA, P. Nanotechnologies and advanced smart materials: The case of architecture and civil engineering. In: **The ELSI Handbook of Nanotechnology: Risk, Safety, ELSI and Commercialization**. [s.l.] Scrivener Publishing LLC, 2020. p. 67–87.

DOD. **Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance Springer Reference**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.springerreference.com/index/doi/10.1007/SpringerReference_24357>.

DOD. **Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook The Joint Service/Industry MRL Working Group**. [s.l: s.n.].

DOD. **Manufacturing Readiness Level Deskbook**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://acqnotes.com/acqnote/careerfields/manufacturing-readiness-levelmanufact>>. Acesso em: 26 fev. 2022.

DOE. **Technology Readiness Assessment Guide**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.directives.doe.gov>. Acesso em: 18 abr. 2020.

DOWLING, A. et al. **Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties** London The Royal Society The Royal Academy of Engineering. [s.l.: s.n.].

DUNN, K. E. The Business of DNA Nanotechnology: Commercialization of Origami and Other Technologies. **Molecules**, v. 25, n. 2, p. 377, 16 jan. 2020.

EARTO. **The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool , EARTO Recommendations Earto Impact Delivered**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.earto.eu/fileadmin/content/03_Publications/The_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-_Final.pdf>.

EISENHARDT, K. M.; GRAEBNER, M. E. Theory building from cases: Opportunities and challenges. **Academy of Management Journal**, v. 50, n. 1, p. 25–32, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL. **Orientação operacional EMBRAPII 098/2019**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <https://embrapii.org.br/wp-content/images/2019/05/0705_Orientacao_Operacional_02-19.pdf>.

ENGINEERING, C. **What is Concurrent Engineering?** Disponível em: <<https://www.concurrent-engineering.co.uk/what-is-concurrent-engineering>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **A European strategy for Key Enabling Technologies – A bridge to growth and jobs**. [s.l.: s.n.].

EUROPEAN COMMISSION. **EU**. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/kets-tools/glossary/ket>>.

FERNANDES, J. M.; REIS, L. P.; SERIO, L. C. DI. Planning Technological Businesses: A Study Of Market Positioning And The Value Chain. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 18, n. 3, p. 70–116, jun. 2017.

FISCHBACH, C. W. P. Technology maturity assessment of carbon composite components. **Advanced Materials Research**, v. 769, p. 335–342, 2013.

FOLEY, R. W.; WIEK, A. Patterns of nanotechnology innovation and governance within a metropolitan area. **Technology in Society**, v. 35, n. 4, p. 233–247, 2013.

FOSSUM, K. R. et al. Toward an integrated project complexity narrative – A case study of academic organizations. **Systems Engineering**, v. 25, n. 5, p. 443–456, 2022.

FRANCO, M. R. **Planejamento adaptativo em gestão de projetos complexos: caracterização e proposta metodológica para o contexto de P&D colaborativo em nanotecnologia**. [s.l.] UFMG, 2023.

FRANK, C. et al. Surviving the “Valley of Death”: A Comparative Analysis.

TECHNOLOGY TRANSFER, n. Spring-Summer, p. 61–69, 1996.

FREEMAN, C. The 'National System of Innovation' in historical perspective. **Cambridge Journal of Economics**, v. 19, n. 1, p. 5–24, fev. 1995.

FREEMAN, S. L. **The Economics of Industrial Innovation**. 3. ed. London: [s.n.].

GAO. **Technology Readiness Assessment Guide: Best Practices for Evaluating the Readiness of Technology for Use in Acquisition Programs and Projects**GAO-16-410G. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gao.gov/assets/680/679006.pdf>>.

GATIGNON, A.; CAPRON, L. The firm as an architect of polycentric governance: Building open institutional infrastructure in emerging markets. **Strategic Management Journal**, 2020.

GERALDI, J.; MAYLOR, H.; WILLIAMS, T. Now, let's make it really complex (complicated). **International Journal of Operations & Production Management**, v. 31, n. 9, p. 966–990, 23 ago. 2011.

GFIC. **Tackling industrial complexity : the ideas that make a difference**. (Richard Huw, Ed.)2nd International Conference of the Manufacturing Complexity Network. **Anais...**Cambridge: Institute for Manufacturing, 2002

GIDADO, K. I. Project complexity: The focal point of construction production planning. **Construction Management and Economics**, v. 14, n. 3, p. 213–225, 21 out. 2010.

GIOIA, D. A.; CORLEY, K. G.; HAMILTON, A. L. Seeking Qualitative Rigor in Inductive Research: Notes on the Gioia Methodology. **Organizational Research Methods**, v. 16, n. 1, p. 15–31, 2013.

GIRMSCHIED, GERHARD BROCKMANN, C. The inherent complexity of large scale engineering projects. **BRISK Binary Robust Invariant Scalable Keyoints**, v. 44, n. 6, p. 12–19, 2008.

GLASER, B.; STRAUSS, A. **The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research**. New York: [s.n.].

GOMES, J.; ROMÃO, M. Improving Project Success: A Case Study Using Benefits and Project Management. **Procedia Computer Science**, v. 100, p. 489–497, 2016.

GOULART, M. B. R. et al. Technology readiness assessment of ultra-deep Salt caverns for carbon capture and storage in Brazil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 99, n. June, p. 103083, 2020.

GUBA YVONN, E. G.; LINCOLN, A. S. Competing Paradigms in Qualitative Research. In: **Handbook of qualitative research** . [s.l.] Sage, 1994. p. 105–117.

HÉDER, M. From NASA to EU: The evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. **Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal**, v. 22, n. 2, p. 1–23, 2017.

HICKS, B. et al. **A methodology for evaluating technology readiness during product development**. International conference on engineering design. **Anais...**2009

ICCPM. **Dimensions of Project Complexity**. Disponível em: <iccpm.com>.

INOVAÇÃO, I. **Nanotecnologia**. [s.l: s.n.].

ISLAM, N. Innovative manufacturing readiness levels (IMRLs): A new readiness matrix. **International Journal of Nanomanufacturing**, v. 6, n. 1–4, p. 362–375, ago. 2010.

ISO/FDIS 16290:2013. **Space systems - Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment** **49.140**. Switzerland: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/56064.html>>.

JENA, B. K.; DAS, B. **Can nanomaterial development & its commercialization be better organized through project management methodologies?** AIP. **Anais...**2023 Disponível em: <<https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2878954>>

JESUS, V. et al. **A capacidade da metodologia de ensino dos institutos federais de educação em formar contribuintes para a produção científica brasileira**. V CONEDU. **Anais...**2017

JOINT RESEARCH CENTRE. **NANoREG framework for the safety assessment of nanomaterials**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://data.europa.eu/doi/10.2760/245972>>.

KAUFMANN, C.; KOCK, A. Does project management matter? The relationship between project management effort, complexity, and profitability. **International Journal of Project Management**, v. 40, n. 6, p. 624–633, 2022.

KAUR, I. P. et al. Issues and concerns in nanotech product development and its commercialization. **Journal of Controlled Release journal**, 2014.

KENNEDY, A. et al. A Definition and Categorization System for Advanced Materials: The Foundation for Risk-Informed Environmental Health and Safety Testing. **Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis**, v. 39, n. 8, p. 1783, 2019.

KIDD, J. M. Exploring the Components of Career Well-Being and the Emotions Associated with Significant Career Experiences. **Journal of Career Development**, v. 35, n. 2, p. 166–186, 1 dez. 2008.

KIM, J.; WILEMON, D. Sources and assessment of complexity in NPD projects. **R&D Management**, v. 33, n. 1, p. 15–30, 2003.

KING, N.; BROOKS, J. M. **Template Analysis for Business and Management Students**. [s.l.] SAGE Publications Ltd, 2017.

KOBOS, P. H. et al. Timing is everything: A technology transition framework for regulatory and market readiness levels. **Technological Forecasting and Social**

Change, v. 137, n. June, p. 211–225, 2018.

KOSHOVETS, O. B.; GANICHEV, N. A. Nanotechnology contribution to innovation-driven growth: hype or hope? **Journal of International Scientific Publications**, v. 10, p. 546–561, 2016.

KOSHOVETS, O. B.; GANICHEV, N. A. Nanotechnology and the new technological revolution: Expectations and reality. **Studies on Russian Economic Development**, v. 28, n. 4, p. 391–397, 2017.

KREUCHAUFF, F.; TEICHERT, N. Nanotechnology as general purpose technology. n. 53, 2014.

KUNZ, J. **Simulating project work processes and organizations: Toward a micro-contingency theory of organizational design**. Disponível em: <https://www.academia.edu/53807332/Simulating_project_work_processes_and_organizations_Toward_a_micro_contingency_theory_of_organizational_design>. Acesso em: 28 fev. 2022.

LANGLEY, A.; ABDALLAH, C. Templates and turns in qualitative studies of strategy and management. **Research Methodology in Strategy and Management**, v. 6, p. 201–235, 2011.

LEITE, L. F. et al. **Developing a Technology Readiness Assessment Methodology for an Energy Company**. International Association for Management of Technology. **Anais...**2015

LERNER, J.; LEAMON, A.; HARDYMON, F. **Venture Capital, Private Equity, and the Financing of Entrepreneurship**. Hoboken, NJ: [s.n.].

LINCOLN, Y. S.; GUBA, E. G. **Naturalistic Inquiry**. Newbury Park: SAGE, 1985.

LINTON, J. D.; WALSH, S. T. A theory of innovation for process-based innovations such as nanotechnology. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 75, n. 5, p. 583–594, jun. 2008.

LIU, J. et al. The Evaluation Index System of Technology Maturity: Taking Hybrid Electric Vehicle as an Example. n. Icassr 2015, p. 543–546, 2016.

LUX RESEARCH. **Sizing nanotechnology's value chain**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.luxresearchinc.com>.

MADHOK, A. Reassessing the fundamentals and beyond: Ronald Coase, the transaction cost and resource-based theories of the firm and the institutional structure of production. **Strategic Management Journal**, v. 23, n. 6, p. 535–550, 2002.

MAINE, E. Overcoming Nanotechnology Commercialisation Challenges: Case Studies of Nanotechnology Ventures. In: CRC PRESS (Ed.). **Nanotechnology Commercialisation**. 1. ed. [s.l.] Pan Stanford Publishing Pte. Ltd, 2013a. p. 205–235.

MAINE, E. Scientist-Entrepreneurs as the Catalysts of Nanotechnology Commercialization. **Reviews in Nanoscience and Nanotechnology**, v. 2, n. 5, p. 301–308, 1 dez. 2013b.

MAINE, E.; GARNSEY, E. Commercializing generic technology: The case of advanced materials ventures. **Research Policy**, v. 35, n. 3, p. 375–393, 2006.

MAINE, E.; GARNSEY, E. The commercialisation environment of advanced materials ventures. **International Journal of Technology Management**, v. 39, n. 2, p. 49–71, 2007.

MAINE, E.; LUBIK, S.; GARNSEY, E. Process-based vs. product-based innovation: Value creation by nanotech ventures. **Technovation**, v. 32, n. 3–4, p. 179–192, 2012.

MAINE, E. M. A. **Innovation and adoption of new materials**. [s.l.] Cambridge University, 2000.

MAINE, E. M. A. Overcoming Nanotechnology Commercialisation Challenges: Case Studies of Nanotechnology Ventures. In: **Nanotechnology commercialization**. [s.l.: s.n.]. p. 205–235.

MAINE, E. M. A.; GARNSEY, E. W. Challenges Facing New Firms Commercialising Nanomaterials. **SSRN Electronic Journal**, 2012.

MAINE, E.; PROBERT, D.; ASHBY, M. Investing in new materials: A tool for technology managers. **Technovation**, v. 25, n. 1, p. 15–23, 2005.

MAINE, E.; SEEGOPPAUL, P. Accelerating advanced-materials commercialization. **Nature Materials**, v. 15, p. 487–491, 2016.

MAIRA, J.; ETXABE, J.; SERENA, P. A. Strategies on Technology Transfer and Patents Commercialization for Nanotechnology at the Spanish National Research Council. **Recent Patents on Nanotechnology**, v. 12, n. 1, p. 45–58, 19 fev. 2018.

MANKINS, J. C. **Technology Readiness Levels: A White Paper**. [s.l.: s.n.].

MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: A retrospective. **Acta Astronautica**, v. 65, n. 9–10, p. 1216–1223, 2009.

MATTHEWS, H. et al. 'It's a silver lining': A template analysis of satisfaction and quality of life following post-mastectomy breast reconstruction. **British Journal of Health Psychology**, v. 23, n. 2, p. 455–475, 1 maio 2018.

MAZZOLA, L. Commercializing nanotechnology. **Nature**, v. 21, n. 10, p. 1137–1143, 2003.

MCGAHN, D. P. Commercializing a new technology in six easy pieces: It all starts with focus. 2005.

MCTIC. **Tecnologias Convergentes e Habilitadoras - Nanotecnologia**. Brasília: [s.n.]. Disponível em:

<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/tecnologias_convergentes/paginas/nanotecnologia/NANOTEKNOLOGIA.html>. Acesso em: 1 mar. 2022.

MEDEIROS, J. C. C. **NOVO ARRANJO PARA INOVAÇÃO NAS INSTITUIÇÕES CIENTÍFICAS, TECNOLÓGICAS E DE INOVAÇÃO (ICT): AMBIENTE TEMÁTICO CATALISADOR DE INOVAÇÃO (ATCI) E A EXPERIÊNCIA DA UFMG**. [s.l.] UFMG, 2020.

MESHALKIN, V. P.; STOYANOVA, O. V.; DLI, M. I. Project management in the nanotechnology industry: Specifics and possibilities of taking them into account. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering**, v. 46, n. 1, p. 50–54, 2012.

MIKKELSEN, M. F. The Complex Project Complexity Identification of Five Ideal Research Types. **Journal of Modern Project Management**, v. 7, n. 4, p. 1–24, 2020.

MIX, A. Follow the money. **Oceanography**, v. 30, n. 2, p. 2008–2009, 2017.

MIYAZAKI, K.; ISLAM, N. Nanotechnology systems of innovation-An analysis of industry and academia research activities. **Technovation**, v. 27, n. 11, p. 661–675, 2007.

MOGOUTOV, A.; KAHANE, B. Data search strategy for science and technology emergence: A scalable and evolutionary query for nanotechnology tracking. **Research Policy**, v. 36, n. 6, p. 893–903, 2007.

MOORE, G. A. **Crossing the Chasm**. Nova York: [s.n.].

MOORHOUSE, D. J. Detailed Definitions and Guidance for Application of Technology Readiness Levels. **Journal of Aircraft**, v. 39, n. 1, p. 190–192, 22 jan. 2001.

MORA-VALENTÍN, E.-M.; NÁJERA-SÁNCHEZ, J.-J.; ORTIZ-DE-URBINA-CRIADO, M. Assessment of success in university–industry cooperation literature: A bibliographic coupling analysis. **Science and Public Policy**, 5 abr. 2022.

MORSE, J. M. et al. Verification Strategies for Establishing Reliability and Validity in Qualitative Research. **International Journal of Qualitative Methods**, v. 1, n. 2, p. 13–22, 2002.

MUFAMADI, M. S. From lab to market: Strategies to nanotechnology commercialization in Africa. **MRS Bulletin**, v. 44, n. 06, p. 421–422, 11 jun. 2019.

NANOVIEW. **Nanotubos Funcionalizados**. Disponível em: <<https://nanoviewnanotecnologia.com/produto/nanotubos-de-carbono-de-paredes-multiplas-funcionalizados/>>.

NASERI, R.; DAVOODI, R. **Commercialization of Nanotechnology in Developing Countries**. International Conference on Information and Financial Engineering. **Anais...**Singapore: IACSIT Press, 2011

NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE. **NNI Supplement to the President's**

Budget. [s.l: s.n.].

NATIONAL NANOTECHNOLOGY INITIATIVE. **Nano Dashboard**. Disponível em: <<https://www.nano.gov/nanodashboard>>.

NGOC, N. M.; HOANG, T. N.; NOGALSKI, B. High tech entrepreneurship in developing countries: Limitations and challenges. **Int. j. adv. multidisc. res. stud**, v. 2, n. 2, p. 35–43, 2022.

NSTC. **The National Nanotechnology Initiative Executive Office of the President**. Washington: [s.n.].

O'CONNOR, C.; JOFFE, H. Intercoder Reliability in Qualitative Research: Debates and Practical Guidelines. **International Journal of Qualitative Methods**, v. 19, p. 1–13, 2020.

O'DONOGHUE, J. Small wonders. **New Scientist**, v. 228, n. 3046, p. 36–39, 2015.

OECD. **The Next Production Revolution**. [s.l.] OECD, 2017.

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

PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory. **Research Policy**, v. 13, n. 1984, p. 343–373, 1984.

PETERSON, S. et al. Enhanced Reader.pdf. **Molecules**, v. 25, n. 112, p. 539–547, 2020.

PICH, M. T.; LOCH, C. H.; DE MEYER, A. On Uncertainty, Ambiguity, and Complexity in Project Management. **Management Science**, v. 48, n. 8, p. 1008–1023, 2002.

PIMENTEL, L. O. et al. **Manual básico de acordos de parceria de PD&I: aspectos Jurídicos**. 1. ed. Porto Alegre: [s.n.].

PISANO, G. P. The evolution of science-based business: innovating how we innovate. **Industrial and Corporate Change**, v. 19, n. 2, p. 465–482, 1 abr. 2010.

PMI. **A Guide to the Project Management Body of Knowledge**. 4. ed. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc., 2008.

PMI. **Navigating Complexity: A practice Guide**. 1. ed. [s.l.] Project Management Institute, Inc., 2014.

PMI. **What is Project Management**. Disponível em: <<https://www.pmi.org/about/learn-about-pmi/what-is-project-management>>. Acesso em: 27 fev. 2022.

PORTER, M. E. **Competitive Advantage**. Nova York: Free Press, 1985.

PRATT, M. G.; KAPLAN, S.; WHITTINGTON, R. Editorial Essay: The Tumult over

Transparency: Decoupling Transparency from Replication in Establishing Trustworthy Qualitative Research*. **Administrative Science Quarterly**, v. 65, n. 1, p. 1–19, 2020.

QIU, J. et al. Nanotechnology development in China: challenges and opportunities. **National Science Review**, v. 3, n. 1, p. 148–152, 1 mar. 2016.

RAMBARAN, T.; SCHIRHAGL, R. Nanotechnology from lab to industry - a look at current trends. **Nanoscale Advances**, v. 4, n. 18, p. 3664–3675, 2022.

REISS, T.; HJELT, K.; FERRARI, A. C. Graphene is on track to deliver on its promises. **Nature Nanotechnology**, v. 14, n. OCTOBER 2019, p. 904–910, 2017.

REMYINGTON, K.; POLLACK, J. **Tool for Complex Projects**. England: Gower Publishing Limited, 2010. v. 4

RENN, O. C.; ROCO, M. **Nanotechnology Risk Governance**. Geneva: [s.n.].

RESENDE, R. G. et al. **Processo de desenvolvimento de produtos integrado com a metodologia de avaliação de prontidão tecnológica: Proposta para um centro de tecnologia em nanomateriais**. Blucher Design Proceedings. **Anais...São Paulo**: Editora Blucher, nov. 2017Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/27571>>

RICHARDSON, K. A. Managing Complex Organizations: Complexity Thinking and the Science and Art of Management. **Practitioner**, v. 10, n. 2, p. 13–26, 2008.

RICHMAN, E. K.; HUTCHISON, J. E. The nanomaterial characterization bottleneck. **ACS Nano**, v. 3, n. 9, p. 2441–2446, 22 set. 2009.

ROCO, M. C. International perspective on government nanotechnology funding in 2005. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 7, p. 707–712, 2005.

RODRIGUES, A.; BOWERS, J. The role of system dynamics in project management. **International Journal of Project Management**, v. 14, n. 4, p. 213–220, 1 ago. 1996.

ROLSTADÅS, A.; SCHIEFLOE, P. M. Modelling project complexity. **International Journal of Managing Projects in Business**, v. 10, n. 2, p. 295–314, 2017.

ROSE, G.; GAZSÓ, A. Governing nanosafety in Austria – Striving for neutrality in the NanoTrust project. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 139, p. 23–31, 2019.

ROSS, J.; STAW, B. M. Organizational Escalation and Exit: Lessons from the Shoreham Nuclear Power Plant. **The Academy of Management Journal**, v. 36, n. 4, p. 701–732, 1993.

RYBICKA, J.; TIWARI, A.; LEEKE, G. A. Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 1001–1012, 20 jan. 2016.

SAN CRISTÓBAL, J. R. et al. Complexity and project management: A general

overview. **Complexity**, v. 2018, p. 10, 2018.

SATO, H. Using grounded theory approach in management research. **Annals of Business Administrative Science**, v. 18, n. 2, p. 65–74, 15 abr. 2019.

SAUSER, B. et al. From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels. **Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA**, n. May, p. 1–10, 2006.

SCHMOCH, U. Double-boom cycles and the comeback of science-push and market-pull. **Research Policy**, v. 36, n. 7, p. 1000–1015, 2007.

SHANE, S. A. **Academic Entrepreneurship: University Spinoffs And Wealth Creation**. [s.l.] Edward Elgar Pub, 2004.

SHAPIRA, P.; YOUTIE, J. Introduction to the symposium issue: nanotechnology innovation and policy —current strategies and future trajectories. **The Journal of Technology Transfer**, v. 36, n. 6, p. 581–586, 14 dez. 2011.

SHEA, C. M. Future management research directions in nanotechnology: A case study. **Journal of Engineering and Technology Management - JET-M**, v. 22, n. 3, p. 185–200, 2005.

SHEA, C. M.; GRINDE, R.; ELMSLIE, B. Nanotechnology as general-purpose technology: Empirical evidence and implications. **Technology Analysis and Strategic Management**, v. 23, n. 2, p. 175–192, 2011.

SILVEIRA, A. D. et al. Análise do Sistema Nacional de Inovação no setor de energia na perspectiva das políticas públicas brasileiras. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 14, n. spe, p. 506–526, 2016.

SINKOVICS, N. Pattern matching in qualitative analysis. In: CASSELL, C.; CUNLIFFE, A.; GRANDY, G. (Eds.). . **The SAGE Handbook of Qualitative Business and Management Research Methods**. Thousand Oaks: SAGE Publications Ltd, 2018. p. 468–485.

SINKOVICS, N. et al. Knowledge Connectivity in an Adverse Context: Global Value Chains and Pakistani Offshore Service Providers. **Management International Review**, v. 59, n. 1, p. 131–170, 1 fev. 2019.

SINKOVICS, N.; SINKOVICS, R. R.; YAMIN, M. The role of social value creation in business model formulation at the bottom of the pyramid – Implications for MNEs? **International Business Review**, v. 23, n. 4, p. 692–707, 1 ago. 2014.

SISNANO. **Nível de maturidade tecnológica dos projetos apoiados pelo SibratecNano**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.sibratecnano.com/wp-content/uploads/2017/11/Nível-de-maturidade-tecnológica-TRL.pdf>>.

SMITH, J. D. An alternative to technology readiness levels for Non-Developmental Item (NDI) software. **Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences**, v. 00, n. C, p. 315, 2005.

SOLOMON, A. The Emergence of Nanotechnology and its Applications. **Research Journal of Nanoscience and Engineering**, v. 2, n. 3, 2018.

STATNANO. **2019's Most-innovative Countries in Nanotechnology**. Disponível em: <<https://statnano.com/news/67294/2019's-Most-innovative-Countries-in-Nanotechnology>>. Acesso em: 20 fev. 2021.

STRAUB, J. In search of technology readiness level (TRL) 10. **Aerospace Science and Technology**, v. 46, p. 312–320, 2015.

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Basics of qualitative research techniques**. [s.l.] Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, 1998.

TAO, L.; PROBERT, D.; PHAAL, R. Towards an integrated framework for managing the process of innovation. **R&D Management**, v. 40, n. 1, p. 19–30, 2010.

TATIKONDA, M. V.; ROSENTHAL, S. R. Technology novelty, project complexity, and product development project execution success: a deeper look at task uncertainty in product innovation. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 47, n. 1, p. 74–87, 2000.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. **Gestão da Inovação**. 3. ed. Porto Alegre: [s.n.].

TROCHIM, W. M. K. Outcome pattern matching and program theory. **Evaluation and Program Planning**, v. 12, n. 4, p. 355–366, 1989.

TSUZUKI, T. Commercial-Scale Production of Nanoparticles. In: **Nanotechnology Commercialization**. 1. ed. New York: Jenny Stanford Publishing, 2016. p. 139–169.

UNGER, D. W.; EPPINGER, S. D. Planning Design Iterations. 2002.

UTTERBACK, J. M. **Mastering the Dynamics of Innovation**. [s.l.] HBS Press, 1994.

VERGA MATOS, P. et al. The adoption of project management methodologies and tools by NGDOs: A mixed methods perspective. **Journal of Business Research**, v. 101, p. 651–659, ago. 2019.

VIDAL, L.; MARLE, F. Understanding project complexity: implications on project management. **Kybernetes**, v. 37, n. 8, p. 1094–1110, 17 set. 2008.

VIJAYAKUMAR, M. D. et al. Evolution and Recent Scenario of Nanotechnology in Agriculture and Food Industries. **Journal of Nanomaterials**, v. 2022, p. 1–17, 11 jul. 2022.

WANG, G.; GUAN, J. Value chain of nanotechnology: A comparative study of some major players. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 14, n. 2, 2012.

WANG, L.; JACOB, J.; LI, Z. Exploring the spatial dimensions of nanotechnology development in China: the effects of funding and spillovers. **Regional Studies**, v. 53, n. 2, p. 245–260, 2019.

WIBLE, J. R.; SEDGLEY, N. H. The role of econometrics in the neoclassical research

program. In: GARNETT, R. F. (Ed.). . **What do economists know?** New York: [s.n.]. p. 169–190.

WIELD, D.; ROY, R. R&D and corporate strategies in UK materials-innovating companies. **Technovation**, v. 15, n. 4, p. 195–210, maio 1995.

WILLIAMS, T.; HILLSON, D. PMI Europe 2001. **International Journal of Project Management**, v. 20, n. 3, p. 183–184, 2002.

WILLIAMS, T. M. The need for new paradigms for complex projects. **International Journal of Project Management**, v. 17, n. 5, p. 269–273, 1 out. 1999.

YOSHIOKA, Y.; TSUTSUMI, Y.; KAZUMA, H. **Nanomaterials in Pharmacology**. [s.l.: s.n.].

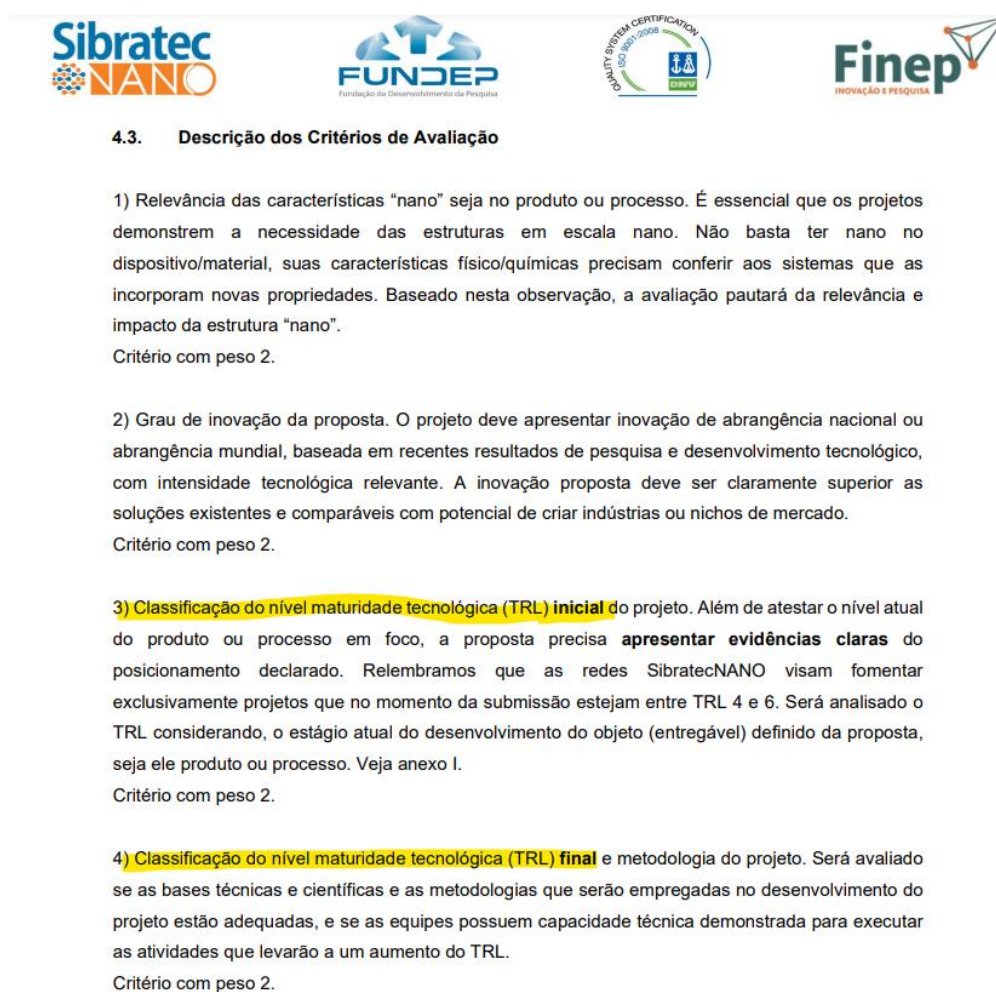
ZHIDEBEKKYZY, A.; KUPESHOVA, S.; YESMURZAYEVA, A. Project management in nanotechnology: A systematic literature review. **Montenegrin Journal of Economics**, v. 15, n. 3, p. 227–244, 2019.

APÊNDICE A – Informações adicionais sobre a escala TRLs

(i) Exemplos de editais com a temática NT e que utilizam a escala TRL na avaliação de projetos

A seguir serão apresentados de forma sucinta alguns editais que explicitam a temática NT e que utilizam a escala TRL para análise das propostas de projetos (ver Figura 31, Figura 32, Figura 33 e Figura 34). A Figura 31 se refere a um edital do Sibratec NANO específico para a seleção de projetos na área de NT, que devem necessariamente envolver em sua execução uma ICT credenciada a rede SisNANO e uma empresa.

Figura 31: Exemplo de edital do Sibratec Nano que tem o TRL como critério de seleção



Fonte: SisNANO (2019)

A Figura 32 faz referência a um edital da Finep, voltado para a iniciativa privada. Este também contempla a área de NT (mesmo que não seja restrito a ela) e especifica bem qual é o TRL que a solução submetida deve possuir para ser passível da obtenção do

financiamento. Isto também se aplica à Figura 33, que se refere a um edital para credenciamento de Unidades Embrapii e a Figura 34, um edital do CNPq.

Figura 32: Exemplo de edital Finep que tem o TRL como critério de seleção



O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e a Financiadora de Estudos e Projetos - Finep tornam pública a presente Seleção visando o fomento e a seleção de projetos de inovação nas temáticas Agro 4.0, Cidades Inteligentes, Indústria 4.0 e Saúde 4.0.

1. OBJETIVO

1.1. Esta Seleção Pública visa conceder recursos de subvenção econômica para o desenvolvimento de produtos, processos e/ou serviços inovadores dentro do escopo das linhas temáticas e tecnologias habilitadoras apresentados no Item 2 a seguir.

1.2. Para o desenvolvimento dos produtos, processos e/ou serviços inovadores referidos no item 1.1 acima, os recursos de subvenção econômica deverão ser aplicados em atividades compreendidas entre os níveis de maturidade tecnológica (TRLs) 3 e 7, sendo que os projetos devem necessariamente prever o atingimento do TRL 7 (demonstração de protótipo do sistema em ambiente operacional), conforme conceito apresentado no Anexo 1 deste Edital, durante o prazo de execução do projeto.

2. LINHAS TEMÁTICAS E TECNOLOGIAS HABILITADORAS

XV. Materiais Avançados

Novos materiais, também chamados de materiais *high tech*, materiais de alta *performance* ou materiais melhorados, que, em resultado de desenvolvimentos inovadores em projeto, técnicas de produção e/ou de processamento, apresentam novas estruturas com propriedades superiores para atender a necessidades específicas e sofisticadas (novas especificações) de aplicações resultantes de avanços científicos e tecnológicos e de novos mercados.

XVI. Nanotecnologia

8 de 22



Fonte: Finep (2020)

Figura 33: Exemplo de edital Embrapii que tem o TRL como critério de seleção e utilizará, inclusive, para avaliar projetos de nanotecnologia



Chamada EMBRAPII 04-2022

1.1 Objetivos específicos da chamada.

Os objetivos específicos da presente Chamada consistem em:

- i. Estabelecer as condições, as regras e os critérios para o credenciamento de Unidades EMBRAPII pelo período estabelecido na seção 8 da chamada. Mediante desempenho suficiente aferido em avaliações conduzidas pela EMBRAPII¹, o credenciamento poderá ser renovado por meio de credenciamentos.
- ii. Orientar a elaboração das propostas de credenciamento dos grupos candidatos, aptos ao desenvolvimento de projetos de pesquisa na fase pré-competitiva da inovação, caracterizada por TRL² entre 3 e 6, em cooperação com empresas industriais.

2. Condições para a candidatura ao credenciamento EMBRAPII.

Poderão se candidatar ao credenciamento como Unidade EMBRAPII todos os grupos das instituições acima qualificadas (vide seção 1), que já desenvolvam parcerias com empresas industriais, na área de competência proposta para credenciamento, que se

Fonte: Embrapii (2022)

Figura 34: Exemplo de edital do CNPq que tem o TRL como critério de classificação e avaliação de projetos (inclusive de Nanotecnologia)



facilitadoras chave); (vi) TRL 6 – Tecnologia demonstrada em ambiente relevante (ambiente industrialmente relevante no caso de tecnologias facilitadoras chave); (vii) TRL 7 – Demonstração de protótipo do sistema em ambiente operacional; (viii) TRL 8 – Sistema completo e qualificado; (ix) TRL 9 – Sistema real comprovado no ambiente operacional (fabricação competitiva no caso de tecnologias facilitadoras essenciais; ou no espaço).

II - Startup: empresa de caráter inovador, que visa aperfeiçoar sistemas, métodos ou modelos de negócio, de produção, de serviços ou de produtos, os quais, quando já existentes, caracterizam startups de natureza incremental, ou, quando relacionados à criação de algo totalmente novo, caracterizam startups de natureza disruptiva (conceito definido com base no Art. 65 A, da Lei Complementar n° 123, de 14 de dezembro de 2006). Para submissão de proposta à presente Chamada, a Startup deve ser composta por no mínimo três pessoas, sendo duas focadas no desenvolvimento do produto e do negócio e uma focada no desenvolvimento da tecnologia, e deve ter até 8 (oito) anos de constituição.

III - Produto Mínimo Viável – MVP: é a versão mais simples de um produto ou processo, capaz de ser testado, analisado ou avaliado por potenciais usuários e que permita à equipe empreendedora ou startup validar seus conceitos e ideias e obter feedbacks para o aperfeiçoamento do produto ou processo.

IV – Prova de Conceito – PoC: procedimento utilizado para testar e avaliar previamente se a teoria, ideia, produto, solução proposta é suscetível de ser explorado de uma maneira útil para uma empresa, com o objetivo de validá-lo em baixa escala, ainda na sua etapa inicial.

1.3 – As linhas elegíveis para esta chamada serão:

1.3.1 – **Linha 1:** Projetos de pesquisa básica e aplicada, com nível de maturidade tecnológica (TRL) entre 1 e 3, realizados por Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT),

1.3.2 – **Linha 2:** Projetos de desenvolvimento tecnológico, com nível de maturidade tecnológica (TRL) entre 4 e 7, realizados por Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT) obrigatoriamente em conjunto com empresas de qualquer porte com, no mínimo, 5 anos de constituição.

Fonte: MCTIC (2022)

(ii) *Adaptações da escala TRL a diferentes contextos*

Um exemplo de adaptação da escala TRL às necessidades específicas do setor e da organização em questão pode ser encontrado no US Department of Health and Human, Figura 35. Neste caso, a escala TRL é usada no setor da saúde como um mecanismo de avaliação e planejamento para avaliar a maturidade de um medicamento e permitir a comunicação sobre o *status* de um medicamento específico.

Figura 35: Adaptação da escala TRL aplicada ao setor da saúde, segundo a EARTO (2014)

**Figure 2: Adapted definition of the TRL scale
used by the US Department of Health and Human services.**

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Review scientific knowledge base	Development of hypotheses and experimental designs	Target/Candidate identification and characterization of preliminary candidate(s)	Candidate optimization and non-GLP In vivo demonstration of activity and efficacy	Advanced characterization of candidate and initiation of GMP process development	GMP Pilot Lot Production, IND Submission, and Phase 1 Clinical Trial(s)	Scale-up, Initiation of GMP Process Validation, and Phase 2 Clinical Trial(s)	GMP Validation Consistency Lot Manufacturing, Efficacy Studies Clinical Trials and FDA Approval	Post-Licensure and Post-Approval Activities

Fonte: EARTO (2014).

Outros exemplos de variações das definições dos TRLs utilizadas por diversas organizações foram apresentadas no guia divulgado pelo US Government Accountability Office (GAO, 2020): (i) Software Technology Readiness Levels, adotado pelo DOD (2009),

Tabela 2; (ii) Hardware Technology Readiness Levels, adotado pela NASA (2013), Tabela 3; (iii) Department of Transportation Technology Readiness Levels, adotado pelo DTA (2017), Tabela 4 e (iv) Technology Readiness Levels, adotado pelo DOE (2011), Tabela 5.

Para a indústria química também foi proposta uma escala TRL adaptada para a nomenclatura e realidade de como o aumento da maturidade ocorre neste setor (BUCHNER et al., 2019), Quadro 19.

Tabela 2: *Software Technology Readiness Levels*

TRL	Definition	Description
1	Basic principles observed and reported.	Lowest level of software technology readiness. A new domain is being investigated by the basic research community. This level extends to the development of basic use, basic properties of software architecture, mathematical formulations, and general algorithms.
2	Technology concept and/or application formulated.	Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative, and there may be no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are limited to analytic studies using synthetic data.
3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept.	Active R&D is initiated. The level at which scientific feasibility is demonstrated through analytical and laboratory studies. This level extends to the development of limited functionality environments to validate critical properties and analytical predictions using non-integrated software components and partially representative data.
4	Module and/or subsystem validation in a laboratory environment (i.e., software prototype development environment).	Basic software components are integrated to establish that they will work together. They are relatively primitive with regard to efficiency and robustness compared with the eventual system. Architecture development initiated to include interoperability, reliability, maintainability, extensibility, scalability, and security issues. Emulation with current/legacy element as appropriate. Prototypes developed to demonstrate different aspects of eventual system.
5	Module and/or subsystem validation in a relevant environment.	Level at which software technology is ready to start integration with existing systems. The prototype implementations conform to target environment/interfaces. Experiments with realistic problems. Simulated interfaces to existing systems. System software architecture established. Algorithms run on a processor(s) with characteristics expected in the operational environment.
6	Module and/or subsystem validation in a relevant end-to-end environment.	Level at which the engineering feasibility of a software technology is demonstrated. This level extends to laboratory prototype implementations on full-scale realistic problems in which the software technology is partially integrated with existing hardware/software systems.
7	System prototype demonstration in an operational, high-fidelity environment.	Level at which the program feasibility of a software technology is demonstrated. This level extends to operational environment prototype implementations, where critical technical risk functionality is available for demonstration and a test in which the software technology is well integrated with operational hardware/software systems.
8	Actual system completed and mission qualified through test and demonstration in an operational environment.	Level at which a software technology is fully integrated with operational hardware and software systems. Software development documentation is complete. All functionality tested in simulated and operational scenarios.
9	Actual system proven through successful mission-proven operational capabilities.	Level at which a software technology is readily repeatable and reusable. The software based on the technology is fully integrated with operational hardware/software systems. All software documentation verified. Successful operational experience. Sustaining software engineering support in place. Actual system.

Source: GAO presentation of DOD information. | GAO-20-48G.

Fonte: DoD (2009)

Tabela 3: *Hardware Technology Readiness Levels*

TRL	Definition	Description
1	Basic principles observed and reported.	Scientific knowledge generated underpinning hardware technology concepts/applications.
2	Technology concept and/or application formulated.	Invention begins, practical application is identified but is speculative, no experimental proof or detailed analysis is available to support the conjecture.
3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept.	Analytical studies place the technology in an appropriate context and laboratory demonstrations, modeling and simulation validate analytical prediction.
4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment.	A low fidelity system/component breadboard is built and operated to demonstrate basic functionality and critical test environments, and associated performance predictions are defined relative to the final operating environment.
5	Component and/or breadboard validation in relevant environment.	A medium fidelity system/component brassboard is built and operated to demonstrate overall performance in a simulated operational environment with realistic support elements that demonstrates overall performance in critical areas. Performance predictions are made for subsequent development phases.
6	System/sub-system model or prototype demonstration in an operational environment.	A high fidelity system/component prototype that adequately addresses all critical scaling issues is built and operated in a relevant environment to demonstrate operations under critical environmental conditions.
7	System prototype demonstration in an operational environment.	A high fidelity engineering unit that adequately addresses all critical scaling issues is built and operated in a relevant environment to demonstrate performance in the actual operational environment and platform (ground, airborne, or space).
8	Actual system completed and "flight qualified" through test and demonstration.	The final product in its final configuration is successfully demonstrated through test and analysis for its intended operational environment and platform (ground, airborne, or space).
9	Actual system flight proven through successful mission operations.	The final product is successfully operated in an actual mission.

Fonte: NASA (2013)

Tabela 4: *Department of Transportation Technology Readiness Levels*

	TRL	Description	To achieve the given TRL, you should answer yes to EVERY question. Discuss any uncertain answers.
Basic Research	1	Basic principles and research	Do basic scientific principles support the concept? Has the technology development methodology or approach been developed?
	2	Application formulated	Are potential system applications identified? Are system components and the user interface at least partly described? Do preliminary analyses or experiments confirm that the application might meet the user need?
	3	Proof of Concept	Are system performance metrics established? Is system feasibility fully established? Do experiments or modeling and simulation validate performance predictions of system capability? Does the technology address a need or introduce an innovation in the field of transportation?
Applied Research	4	Components validated in laboratory environment	Are end-user requirements documented? Does a plausible draft integration plan exist, and is component compatibility demonstrated? Were individual components successfully tested in a laboratory environment (a fully controlled test environment where a limited number of critical functions are tested)?
	5	Integrated components demonstrated in a laboratory environment	Are external and internal system interfaces documented? Are target and minimum operational requirements developed? Is component integration demonstrated in a laboratory environment (i.e., fully controlled setting)?
Development	6	Prototype system demonstrated in a relevant environment	Is the operational environment (i.e., user community, physical environment, and input data characteristics, as appropriate) fully known? Was the prototype tested in a realistic and relevant environment outside the laboratory? Does the prototype satisfy all operational requirements when confronted with realistic problems?
Development	6	Prototype system demonstrated in a relevant environment	Is the operational environment (i.e., user community, physical environment, and input data characteristics, as appropriate) fully known? Was the prototype tested in a realistic and relevant environment outside the laboratory? Does the prototype satisfy all operational requirements when confronted with realistic problems?
	7	Prototype demonstrated in operational environment	Are available components representative of production components? Is the fully integrated prototype demonstrated in an operational environment (i.e., real-world conditions, including the user community)? Are all interfaces tested individually under stressed and anomalous conditions?
	8	Technology proven in operational environment	Are all system components form-, fit-, and function-compatible with each other and with the operational environment? Is the technology proven in an operational environment (i.e., meet target performance measures)? Was a rigorous test and evaluation process completed successfully? Does the technology meet its stated purpose and functionality as designed?
Implementation	9	Technology refined and adopted	Is the technology deployed in its intended operational environment? Is information about the technology disseminated to the user community? Is the technology adopted by the user community?

Fonte: Departamento de Transporte americano (2017)

Tabela 5: *Technology Readiness Levels*

TRL	Definition	Description
1	Basic principles observed and reported	This is the lowest level of technology readiness. Scientific research begins to be translated into applied R&D. Examples might include paper studies of a technology's basic properties or experimental work that consists mainly of observations of the physical world. Supporting Information includes published research or other references that identify the principles that underlie the technology.
2	Technology concept and/or applications formulated	Once basic principles are observed, practical applications can be invented. Applications are speculative, and there may be no proof or detailed analysis to support the assumptions. Examples are still limited to analytic studies. Supporting information includes publications or other references that outline the application being considered and that provide analysis to support the concept. The step up from TRL 1 to TRL 2 moves the ideas from pure to applied research. Most of the work is analytical or paper studies with the emphasis on understanding the science better. Experimental work is designed to corroborate the basic scientific observations made during TRL 1 work.
3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept	Active research and development is initiated. This includes analytical studies and laboratory-scale studies to physically validate the analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative tested with simulants. Supporting information includes results of laboratory tests performed to measure parameters of interest and comparison to analytical predictions for critical subsystems. At TRL 3 the work has moved beyond the paper phase to experimental work that verifies that the concept works as expected on simulants. Components of the technology are validated, but there is no attempt to integrate the components into a complete system. Modeling and simulation may be used to complement physical experiments.
4	Component and/or system validation in laboratory environment	The basic technological components are integrated to establish that the pieces will work together. This is relatively "low fidelity" compared with the eventual system. Examples include integration of ad hoc hardware in a laboratory and testing with a range of simulants and small scale tests on actual waste. Supporting information includes the results of the integrated experiments and estimates of how the experimental components and experimental test results differ from the expected system performance goals. TRL 4-6 represent the bridge from scientific research to engineering. TRL 4 is the first step in determining whether the individual components will work together as a system. The laboratory system will probably be a mix of on hand equipment and a few special purpose components that may require special handling, calibration, or alignment to get them to function.
5	Laboratory scale, similar system validation in relevant environment	The basic technological components are integrated so that the system configuration is similar to (matches) the final application in almost all respects. Examples include testing a high-fidelity, laboratory scale system in a simulated environment with a range of simulants ¹ and actual waste. Supporting information includes results from the laboratory scale testing, analysis of the differences between the laboratory and eventual operating system/environment, and analysis of what the experimental results mean for the eventual operating system/environment. The major difference between TRL 4 and 5 is the increase in the fidelity of the system and environment to the actual application. The system tested is almost prototypical.
6	Engineering/pilot-scale, similar (prototypical) system validation in relevant environment	Engineering-scale models or prototypes are tested in a relevant environment. This represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include testing an engineering scale prototypical system with a range of simulants. Supporting information includes results from the engineering scale testing and analysis of the differences between the engineering scale, prototypical system/environment, and analysis of what the experimental results mean for the eventual operating system/environment. TRL 6 begins true engineering development of the technology as an operational system. The major difference between TRL 5 and 6 is the step up from laboratory scale to engineering scale and the determination of scaling factors that will enable design of the operating system. The prototype should be capable of performing all the functions that will be required of the operational system. The operating environment for the testing should closely represent the actual operating environment.
7	Full-scale, similar (prototypical) system demonstrated in relevant environment	This represents a major step up from TRL 6, requiring demonstration of an actual system prototype in a relevant environment. Examples include testing full-scale prototype in the field with a range of simulants in cold commissioning. Supporting information includes results from the full-scale testing and analysis of the differences between the test environment, and analysis of what the experimental results mean for the eventual operating system/environment. Final design is virtually complete.
8	Actual system completed and qualified through test and demonstration. Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this TRL represents the end of true system development.	The technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this TRL represents the end of true system development. Examples include developmental testing and evaluation of the system with actual waste in hot commissioning. Supporting information includes operational procedures that are virtually complete. An Operational Readiness Review (ORR) has been successfully completed prior to the start of hot testing.
9	Actual system operated over the full range of expected conditions. Actual operation of the technology in its final form, under the full range of operating conditions.	The technology is in its final form and operated under the full range of operating mission conditions. Examples include using the actual system with the full range of wastes in hot operations.

Source: GAO presentation of DOE information. | GAO-20-48G

Fonte: DoE (2011)

Quadro 19: Escala TRL adaptada para a indústria química

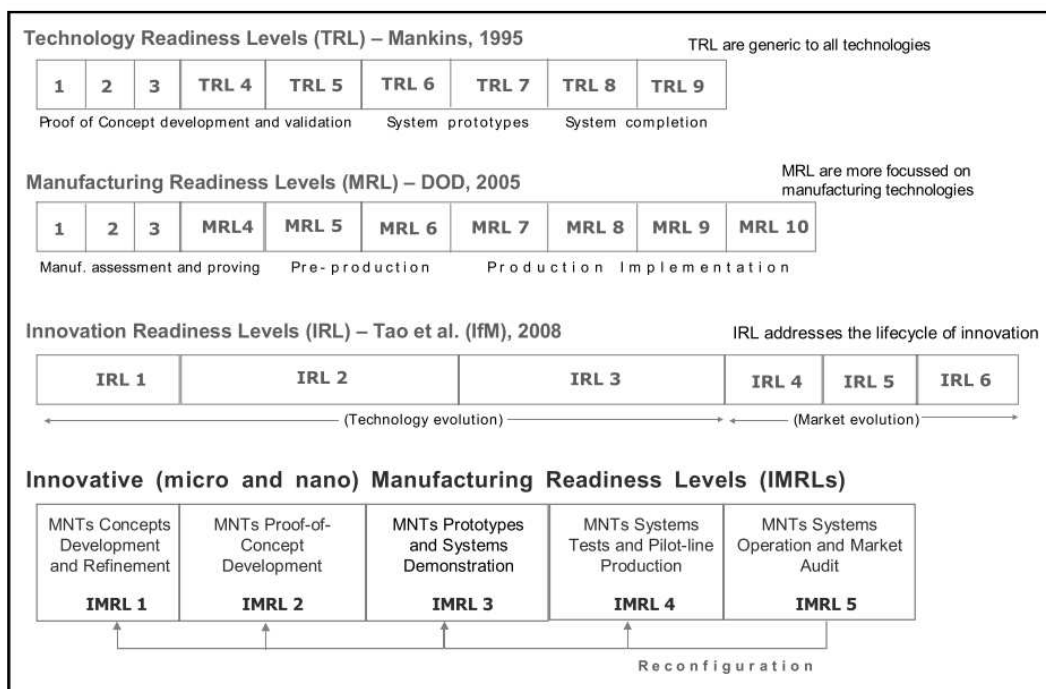
TRL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Title	Idea	Concept	Proof of concept	Primary process development	Detailed process development	Pilot trials	Demonstration and full-scale engineering	Commissioning	Production	
Description	Opportunities identified, basic research translated into possible applications (e.g. by brain-storming, literature study)	Technology concept and/or application formulated, patent research conducted	Applied laboratory research started, functional principle / reaction (mechanism) proven, predicted reaction observed (qualitatively)	Concept validated in laboratory environment, scale up preparation started, short out process models found	Process models found, property data analysed, simulation of process and pilot plant using bench scale information	Pilot plant constructed and operated with low rate production, products approved in final application, detailed process models found	Parameter and performance of pilot plant optimized, (optional) demo plant constructed and operating, equipment specification including components that are type conformable to full-scale production	Products and processes integrated in organisational structure (hardware and software), full-scale plant constructed	Full-scale plant audited (safety acceptance test), turn-key plant, production operated over the full range of expected conditions in industrial scale and environment, performance guarantee enforceable	
General project criteria	Tangible work result	Idea / rough concept / vision / strategy paper	Technology concept formulated, list of solutions, future R&D activities planned	Proof of concept (in laboratory)	Documentation of reproduced and predictable (quantitative) experiment results, multiple alternative process concepts evaluated	Parameter and property data, few alternative process concepts evaluated in detail	Working pilot plant	Optimized pilot plant, (optional) working demo plant, simple production, finalized and qualified system and building plan	Finalized and qualified system and building plan	Full-scale plant tested and working
	Workplace	Office (sheets of paper (physical or digital), whiteboard or similar)	Office (sheets of paper (physical or digital), whiteboard or similar)	Laboratory	Laboratory	Laboratory/pilot plant	Pilot plant, technical center	Pilot plant, technical center, (optional) demo plant (potentially incorporated in production site)	Production site	Production site
	Product (economic)	General research (internal or external) that can influence the product concept, user survey conducted	Initial product concept formulated, detailed user survey conducted	Product concept and resulting applications tested in laboratory, first user tests conducted	Further experiments, application spectrum / improve usability, user feedback process implemented	Product properties detailed	Product properties finalized (will not be changed)	Tested in industrially relevant working environment	Final product customer accepted and final feedback included	Product ready (for sale)
Engineering criteria	Reaction engineering (including kinetics, thermodynamics, property data, conversion, selectivity, yield)	Product groups/class technology field specified (e.g. fuels, minerals, technical gases, biotechnology, catalyst change, nanotechnology)	Chemical reaction selected, number of reaction steps identified	Target values defined (e.g. for conversion, selectivity, yield) for laboratory scale with respect to conversion, transfer (relevant parameters observed), thermodynamics, kinetic description of main reaction, physical properties and catalyst synthesis obtained, mass balance, closed	Feasibility of reaction confirmed, reaction optimized in laboratory scale with respect to conversion, selectivity, additives, catalysts, solvents, and side-products	Detailed kinetic data available: product stability / decomposition known (rate, mechanism, occurring chemicals), controllability, mechanisms studied, cost/benefit analysis and material selected	Product and reaction (by) discovered and understood, kinetic system of all occurring reactions	Target values for full-scale production defined, parameters optimized by sensitivity, detailed property data available	Startup of plant initiated	Target values for full-scale plant met, optimisation
	Process engineering (including up- & downstream and process technology of reaction steps)	-	Unit operations (classes) identified (e.g. separation)	Options for unit operations found (e.g. distillation), single step/unit operation options conducted	Unit operations detailed (e.g. rectification), process concept validated in laboratory, range for all characteristic operating conditions (pressure, temperature, concentrations) identified, relevant kinetic and thermodynamic parameters available from approximations or literature data base, amount of energy needed estimated (based on thermodynamics key steps) for all unit operations	Process concept refined based on laboratory experiments and simulation of single steps/unit operations, relevant kinetic and thermodynamic parameters available from calculation or measurements, further equipment description (e.g. tray column), but concept for empirically scaled units, energy source (types) for unit operations specified	Pilot size unit operations and downstream steps engineered and proven feasible in low rate production, further equipment specification (e.g. bubble cap tray column), elevation and materials of equipment specified, long-term stability proven (e.g. accumulation of side products handled, catalyst durability known), amount of energy needed known for all unit operations	All unit operations connected, downstream system proven suitable for demo scale, final equipment types for full-scale plant defined, all synthesis (reaction) and process units coordinated/balanced, equipment sizing and instrumentation design, optimized equipment specification (e.g. detailed tray design), insulation described	Equipment/apparatuses adapted to full-scale process	Optimisation
	Flow diagrams	-	-	Block diagram, crude/initial concepts for processes identified	Enhanced block diagram, including mass flows	Process flow diagram developed including mass and energy flows	Enhanced process flow diagram, essential instruments (e.g. valves) decided (energy, mass flows), process integration concept	P&ID diagram developed (all recycling streams/circular flows, list of engines)	Optimisation	-
Capacity as fraction of full-scale ready / scale-up factor to full-scale	True commodities	-	-	<0.001% / >100000	<0.01% / >10000	<0.1% / >1000	<1% / >100	<3% / >33	-	100%
	Pseudocommodities	-	-	<0.003% / >33333	<0.02% / >5000	<0.1% / >1000	<1% / >100	<3% / >33	-	100%
	Fine chemicals	-	-	<0.025% / >4000	<0.1% / >1000	<0.4% / >250	<2% / >50	<5% / >15	-	100%
	Specialty chemicals	-	-	<0.125% / >800	<0.4% / >250	<1% / >100	<4% / >25	<10% / >10	-	100%

Fonte: Buchner et. al (2019)

Para o entendimento e avaliação da maturidade das tecnologias de micro e nano fabricação, foi proposta por Islam (2010) uma matriz de prontidão chamada Níveis de Prontidão de Manufatura inovadores (IMRLs). Dentro da matriz de IMRLs, cinco fases-chave e cinco medidas de desempenho são propostas para capturar os principais atributos que determinam a efetiva implementação e adoção de tecnologias de micro e nano manufatura. A Figura 36 ilustra a escala bem como uma comparação com outras citadas anteriormente.

Como uma das principais motivações para o desenvolvimento dessa escala, tem-se os desafios do dia a dia presentes na gestão do ciclo de vida das tecnologias de micro e nano manufatura, que demandam abordagens inovadoras ou aprimoradas. Tais desafios podem ser associados à natureza interdisciplinar dos desenvolvimentos nestas áreas, onde tecnologias de múltiplos componentes podem ser desenvolvidas em paralelo (ISLAM, 2010).

Figura 36: Níveis de Prontidão de Manufatura Inovadores



Fonte: Islam (2010)

No que tange a utilização da escala TRL e suas adaptações para a avaliação de projetos tem-se, por exemplo, a abordagem utilizada pela Embrapii (2019), Quadro 20. A instituição divulga uma equivalência entre a escala TRL e as escalas de Manufacturing Readiness Levels (MRLs) e Software Technology Readiness Levels (STRL), que devem ser utilizadas para a avaliação do ponto de partida e resultados dos projetos de tecnologias.

O Quadro 20 apresenta o TRL e as dimensões para a análise dos elementos do objeto do desenvolvimento, com sua equivalência para as escalas MRLs e STRL. Vale ressaltar a existência de similaridades existentes entre a Tabela 2 e a Tabela 3, que abordam respectivamente, a escala Software Technology Readiness Levels, adotado pelo DOD (2009) e Hardware Technology Readiness Levels, adotado pela NASA (2013).

Quadro 20: Aplicação da escala TRL para em editais Embrapii para avaliação de projetos

EMBRAPII - Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial								
TRL e as dimensões para análise dos elementos do objeto do desenvolvimento, com sua equivalência para as escalas MRL e STRL ^[1]								
Definição escala TRL ^[2]				Definição escala MRL ^[3]			Definição escala STRL ^[4]	
Nível de maturidade TRL ^[5]	Dimensões de análise			Descrição geral para Produtos	Nível de maturidade MRL	Descrição geral para Processos (Relativo à capacidade de produzir)	Nível de maturidade STRL	Descrição geral para Software
	Escala (do objeto)	Fidelidade (do objeto)	Ambiente (No qual a função tecnológica é desenvolvida)					
1	---	Descrição	---	Princípios básicos observados e reportados.	1	Factível de ser produzido: descrição	1	Início da conceitualização básica provendo o detalhamento da "formulação matemática"
2	---	Descrição	---	Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada.	2	Conceito de manufatura definido: descrição	2	"Algoritmos" ou funções básicas são prototipadas e documentadas
3	Laboratório	Componentes físicos.	Emulação / Simulado	Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica ou experimental.	3	Processo de manufatura desenvolvido: prova de conceito para fazer funcionar	3	Algoritmos são executados e testados em processador representativo, em laboratório. "Protótipo"
4	Laboratório	Componentes físicos representantes da função total.	Emulação / Simulado	Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais básicos de laboratório - "breadboard".	4	Capacidade de produzir a tecnologia em ambiente laboratorial. Fazer funcionar apropriadamente	4	Componentes básicos do software são integrados para estabelecer trabalharão juntos. "Earliest version"
5	Laboratório	Similar: a configuração corresponde a aplicação final em quase todos os aspectos	Relevante	Validação em ambiente relevante de componentes ou arranjos experimentais com configurações física final - "brassboard".	5	Capacidade de produzir protótipo do componente do produto em ambiente relevante de produção. Desenvolvimento Tecnológico para maximizar o desempenho	5	Todos os componentes do software são integrados em versão realística. O software é testado em ambiente controlado nas instalações do desenvolvedor. "Versão alfa"

6	Engenharia ou Piloto: 1/10 da escala final podendo ser menor dependendo da aplicação, dado que Engenharia/Piloto < Escala final.	Similar: a configuração corresponde a aplicação final em quase todos os aspectos	Relevante: ambiente de teste que estimula os aspectos fundamentais do ambiente operacional.	Modelo do sistema ou subsistema, com protótipo de demonstrador em ambiente relevante.	6	Capacidade de produzir o produto ou seus subconjuntos em ambiente relevante de produção. Demonstração tecnológica: a tecnologia está em fase de testes sem alcançar a escala final. O projeto não está finalizado, podendo utilizar uma gama limitada de modelos de simulação (<i>dummies</i>) e não alcançar o desempenho final. Busca maximizar a eficiência.	6	Protótipo completo é testado em ambiente virtual ou simulado. O software ainda esta em desenvolvimento. "Versão beta"
7	Final / Completo: aplicação em escala final	Similar: a configuração corresponde a aplicação final em quase todos os aspectos.	Operacional: ambiente que engloba todos os requisitos operacionais e especificações exigidas do produto.	Protótipo do demonstrador do sistema em ambiente operacional.	7	Capacidade de produzir o produto ou seus subconjuntos em ambiente representativo de produção. A tecnologia esta em comissionamento inativo (<i>cold</i>). Isto pode incluir testes operacionais e testes de fabricação, mas é testado usando modelos ou simuladores inativos (<i>dummies</i>) compatíveis com o produto final.	7	Verificação e validação são concluídas, a validade da solução é confirmada dentro do aplicativo pretendido. A especificação de requisitos é validada pelos usuários. O suporte de engenharia e organização de manutenção, incluindo o serviço de assistência técnica, estão em vigor. "Product release"
8	Final / Completo: aplicação em escala final	Idêntico: corresponde a aplicação final em todos os aspectos.	Operacional: ambiente que engloba todos os requisitos operacionais e especificações exigidas do produto.	Sistema totalmente completo, testado, qualificado e demonstrado. Exemplos incluem a aprovação.	8	Implementa a produção, minimizar custos. Tecnologia em comissionamento ativo (<i>hot</i>).	8	Fim do desenvolvimento do sistema. Inclui teste e avaliação no sistema pretendido quanto às suas especificações. O resultado é versão de produção com configuração controlada. Documentação completa. "General product"
9	Final / Completo: aplicação em escala final	Idêntico: corresponde a aplicação final em todos os aspectos.	Operacional: ambiente que engloba todos os requisitos operacionais e especificações exigidas do produto.	O sistema já foi operado em todas as condições, extensão e alcance. Exemplos incluem o uso do produto em todo seu alcance e quantidade.	9 / 10	Produção estabelecida, busca operação e/ou melhoria	9	Representa a aplicação real do software em sua forma final e sob condições projetadas, como as encontradas no teste operacional e na avaliação. "Live product", software em uso.

NOTAS: [1] - Referência primária na Norma ISO 16290, [2] - TRL - Technology Readness Level, [3] - MRL - Manufacturing Readness Level, [4] - STRL - Software Technology Readness Level. [5] - Valores a serem lançados no Sistema de Registro de Informações - SRInfo da EMBRAPII para fins de acompanhamento e avaliação.

Fonte: Embrapii (2019)

(iii) *Utilização de escalas complementares para a avaliação de aspectos não tecnológicos*

A atenção a aspectos não tecnológicos, como a prontidão de uma inovação para ir ao mercado e a prontidão de uma organização para implementar a inovação, não estão presentes na escala original dos TRLs (EARTO, 2014). Diante disso, foram surgindo escalas que abrangessem aspectos complementares, que pudessem ser utilizadas para avaliar outros aspectos da solução simultaneamente a escala TRL, como é o caso do *Manufacturing Readiness Levels* (MRLs), Quadro 20.

O MRL é baseado em uma escala de 1 a 10, sendo 10 o processo de manufatura mais maduro. O objetivo dos MRLs é fornecer aos tomadores de decisão um entendimento comum da maturidade relativa e dos riscos associados à manufatura de tecnologias, produtos e processos que estão sendo avaliados (DAU, 2022).

Diferentemente do TRL que tem como foco a análise da tecnologia de forma individual, a classificação dos MRLs pode ser utilizada para avaliar a maturidade de uma determinada tecnologia, sistema, subsistema ou componente de uma perspectiva de fabricação (DOD, 2015).

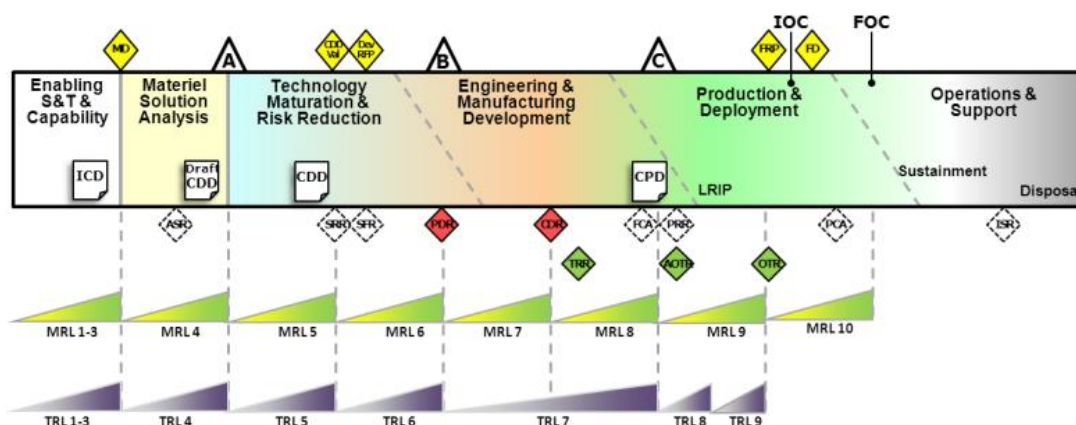
De acordo com DoD (2012) a prontidão da tecnologia e a prontidão da manufatura andam lado a lado, Figura 37. Juntas essas escalas são medidas-chave para entender o risco de transferir para um sistema uma tecnologia ou processo com um determinado nível de maturidade (DOD, 2015). Outro exemplo de utilização da escala MRLs pode ser visto na abordagem utilizada pela Embrapii (2019), Quadro 20, para a avaliação de projetos.

Quadro 21: Escala MRL

Level	Definition	DoD MRL Description
1	Basic Manufacturing Implications Identified	Basic research expands scientific principles that may have manufacturing implications. The focus is on a high-level assessment of manufacturing opportunities. The research is unfettered.
2	Manufacturing Concepts Identified	This level is characterized by describing the application of new manufacturing concepts. Applied research translates basic research into solutions for broadly defined military needs.
3	Manufacturing Proof of Concept Developed	This level begins the validation of the manufacturing concepts through analytical or laboratory experiments. Experimental hardware models have been developed in a laboratory environment that may possess limited functionality.
4	Capability to produce the technology in a laboratory environment	This level of readiness acts as an exit criterion for the MSA Phase approaching a Milestone A decision. Technologies should have matured to at least TRL 4. This level indicates that the technologies are ready for the Technology Development Phase of acquisition. Producibility assessments of design concepts have been completed. Key design performance parameters have been identified as well as any special tooling, facilities, material handling and skills required.
5	Capability to produce prototype components in a production relevant environment	Mfg. strategy refined and integrated with Risk Management Plan. Identification of enabling/critical technologies and components is complete. Prototype materials, tooling, and test equipment, as well as personnel skills have been demonstrated on components in a production-relevant environment, but many manufacturing processes and procedures are still in development.
6	Capability to produce a prototype system or subsystem in a production relevant environment	This MRL is associated with readiness for a Milestone B decision to initiate an acquisition program by entering into the EMD Phase of acquisition. Technologies should have matured to at least TRL 6. The majority of manufacturing processes have been defined and characterized, but there are still significant engineering and/or design changes in the system itself.
7	Capability to produce systems, subsystems, or components in a production representative environment	System detailed design activity is nearing completion. Material specifications have been approved and materials are available to meet the planned pilot line build schedule. Manufacturing processes and procedures have been demonstrated in a production representative environment. Detailed producibility trade studies are completed and producibility enhancements and risk assessments are underway. Technologies should be on a path to achieve TRL 7.
8	Pilot line capability demonstrated; Ready to begin Low Rate Initial Production	The system, component or item has been previously produced, is in production, or has successfully achieved low rate initial production. Technologies should have matured to TRL 9. This level of readiness is normally associated with readiness for entry into Full Rate Production (FRP). All systems engineering/design requirements should have been met such that there are minimal system changes. Major system design features are stable and have been proven in test and evaluation.
9	Low rate production demonstrated; Capability in place to begin Full Rate Production	The system, component, or item has been previously produced, is in production, or has successfully achieved low-rate initial production (LRIP). Technologies should have matured to TRL 9. This level of readiness is normally associated with readiness for entry into Full-Rate Production (FRP). All systems engineering/design requirements should have been met such that there are minimal system changes.
10	Full Rate Production demonstrated and lean production practices in place	Technologies should have matured to TRL 9. This level of manufacturing is normally associated with the Production or Sustainment phases of the acquisition life cycle. Engineering/design changes are few and generally limited to quality and cost improvements. System, components or items are in full-rate production and meet all engineering, performance, quality and reliability requirements. Manufacturing process capability is at the appropriate quality level.

Fonte: DoD (2015)

Figura 37: Diferença TRL e MRLs



Fonte: Amestjr (2015)

Outra abordagem complementar que já foi citada anteriormente de forma comparativa com outras escalas, Figura 36, são os Níveis de Prontidão da Inovação, ou *Innovation Readiness Levels* (IRLs). Esse modelo foi criado para auxiliar no gerenciamento do processo de inovação incremental, a partir da descrição do desenvolvimento de uma inovação ao longo de seu ciclo de vida (TAO; PROBERT; PHAAL, 2010).

O ciclo de vida da inovação é então dividido em seis fases, Figura 38, e para cada fase são identificados aspectos-chave (tecnologia, mercado, organização, parceria e risco) e critérios de avaliação associados (TAO; PROBERT; PHAAL, 2010). É interessante ressaltar que os IRLs 1-3 que se referem ao desenvolvimento tecnológico podem ser comparados à escala tradicional de TRLs de 1-9, (MANKINS, 1995). Enquanto os IRLs de 4-6 ocorrem após o TRL9, e estão associados à evolução do mercado.

Kobos et al. (2018) introduziram duas outras abordagens complementares aos TRLs: *Market Readiness Level* e *Regulatory Readiness Level*, Figura 39. O primeiro tem como foco responder a seguinte questão: “nós podemos aceitar isso?”, enquanto o segundo “eles irão adotar isso?”. Juntas essas duas abordagens são chamadas *Technology, Regulatory and Market Readiness Level (TRML)* (KOBOS et al., 2018). O objetivo principal desse *framework* é auxiliar no desenvolvimento necessário para convergir os objetivos técnicos, mercadológicos e regulatórios (KOBOS et al., 2018).

Figura 38: *Innovation Readiness Levels*

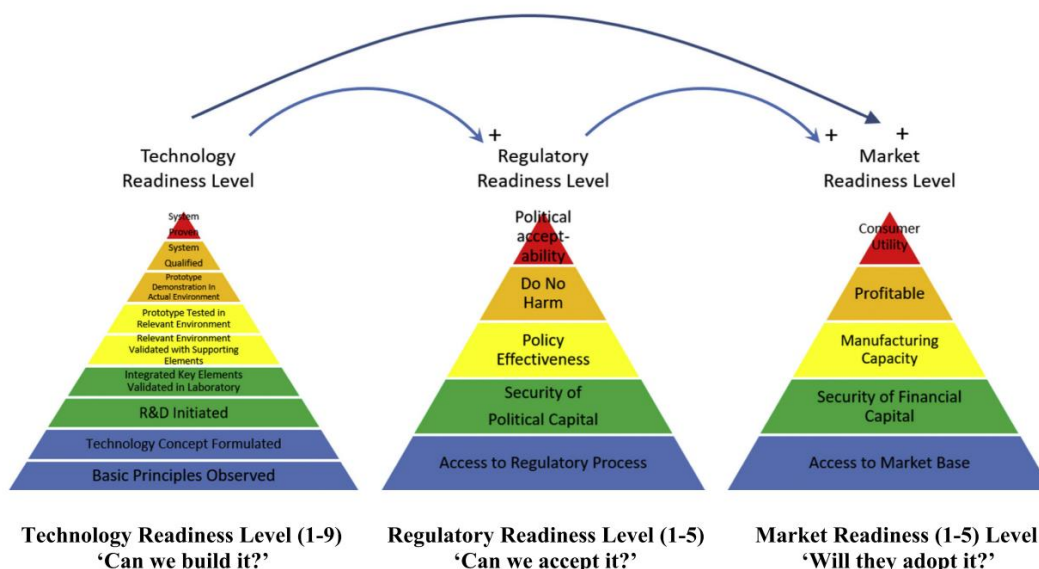
Table 6. An initial framework of innovation-readiness levels (IRL)

Innovation-readiness levels	Technological development			Market evolution		
	IRL 1 Concept	IRL 2 Components	IRL 3 Completion	IRL 4 Chasm	IRL 5 Competition	IRL 6 Changeover/ closedown
Key aspects						
Technology	Potential improvements of existing technologies or products identified and reported; <i>Technology feasibility confirmed</i>	<i>Individual components tested; Prototypes demonstrated; IP protected</i>	<i>Actual system demonstrated; External test completed; IP protected; Technology/product documented; Launch</i>	Expertise formed; <i>General availability to the market;</i> Aftersales support	Lower R&D activities; Technology maintenance enabled; Technological service provided	<i>Re-innovate or exit</i>
Market	<i>Market research conducted; Working with leading customers;</i> Customer needs and demands observed	End-customer identified; Detailed market launch plan issued	Specific needs and requirements of customers known; Market segment, size and share predicted; Pricing & Launching issued	Positioning in the market; <i>Business model established;</i> Customer-intimate marketing (feedback); Competitors identified; Partnership is an option to break into market	Products differentiated; Service and solutions provided; Periodical review conducted; Business model refined; Partnership is an option to compete	Declining market confirmed; Market research conducted for approval to re-innovate or exit
Organisation	Strategy fit confirmed;	Business analysed and plan issued; Key individuals involved	Formalising organisation	Formal organisation established	Improved effectiveness and cooperation; Necessary re-structure made	
Partnership	<i>Potential partners identified</i>	<i>Partners selected; Calibration established</i>	<i>Partnership formally established</i>	<i>Cooperation within dynamic network; On-going management</i>		Cease partnership
Risk	Technology risk considered	Technological risk assessed (alternative solution considered); Market risk assessed; Organisational risk considered (investment plan initiated and investment started)	Technological risk assessed; Organisational risk assessed (profit predicted; large investment issued)	Organisational risk periodically assessed (especially financial indicators)	Organisational risk periodically assessed (especially financial indicators)	Re-innovate or exit considered; Changeover or closedown plan issued

Activities or criteria first provided by the literature are in italics. Activities or criteria observed from case studies are in normal.

Fonte: Tao, Probert e Phaal (2010)

Figura 39: Comparação TRL, RRL e TRML



Fonte: Kobos et al. (2018)

Além disso, Hicks (2009) criou o *Technology Readiness Level of the Product* (TRLPROD), Figura 40, uma metodologia para avaliar a maturidade tecnológica durante o desenvolvimento do produto, o qual define também os níveis 10 e 11 para o processo de desenvolvimento do produto.

Figura 40: TRLPROD

TRL _{PROD}	Marketing	Manufacturing	Other Functions	Development Phase
2	<ul style="list-style-type: none"> Target market identified. 	-	<ul style="list-style-type: none"> Business goals of development effort defined. 	<i>Mission Statement</i>
3	<ul style="list-style-type: none"> Market segments defined. Lead users & their needs identified. Competing products analysed. 	<ul style="list-style-type: none"> Manufacturing cost estimated. Production feasibility assessed. 	<ul style="list-style-type: none"> Single concept selected for further development. Project justified economically. IPR issues investigated. 	<i>Concept Development</i>
4	<ul style="list-style-type: none"> Plan for product options and extended product family formulated. 	<ul style="list-style-type: none"> Make-or-Buy analysis performed. Key suppliers identified. Final assembly scheme designed. 	<ul style="list-style-type: none"> Support Make-or-Buy analysis. Potential service issues identified. 	<i>System-Level Design</i>
5	<ul style="list-style-type: none"> Marketing plan developed. 	<ul style="list-style-type: none"> Standard parts identified. Production processes defined. Tooling designed. Long lead-time tooling procured. Quality assurance processes defined. 	<ul style="list-style-type: none"> Control documentation issued. 	<i>Detail Design</i>
6	<ul style="list-style-type: none"> Promotion and launch materials developed. 	<ul style="list-style-type: none"> Supplier 'ramp-up' facilitated. 	<ul style="list-style-type: none"> Sales plan finalised. 	<i>Testing and Refinement</i>
7	<ul style="list-style-type: none"> Field-testing facilitated. 	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication and assembly processes refined. 	<ul style="list-style-type: none"> Regulatory approval / certification obtained. 	
8		<ul style="list-style-type: none"> Commence work force training. Quality assurance processes refined. 		
9	<ul style="list-style-type: none"> Early 'production ramp-up' products placed with preferred customers. 	<ul style="list-style-type: none"> Work force training completed. Operation of entire production system commenced. 	-	<i>Production Ramp-Up</i>
9	<i>Product Promotion</i>	<i>Full Production</i>	<i>Active Service & Support Infrastructure</i>	<i>Product Launch</i>

TRL	Definition
10.2	The enhancement of an existing element or the introduction of a 'sustaining technology' to an already operational component, sub-system or system is conceived. Commencement of applied research.
10.3	Feasibility and key benefits of enhancement or introduction initially validated through active R&D (Physical validation and analytical study of technology in appropriate context)
10.4	Low-fidelity validation of new 'feature' in a laboratory environment. Technological implementation now focussed on meeting project requirements.
10.5	Validation of new 'feature' in a relevant environment. Test 'set-up' to be of higher fidelity than at TRL 4 (Basic integration of new 'feature' with established components required for a sub-system or system).
10.6	High-fidelity 'alpha' prototype of (Or incorporating) new 'feature' demonstrated in a relevant environment.
10.7	'Beta' prototype (Of appropriate or full-scale) demonstrated in operational environment (New element must be fully integrated with established components for a sub-system or system).
10.8	New 'feature' qualified to relevant project requirements and/or regulatory standards.
10.9	Revised and certified component, sub-system or system proven to all governing meet requirements through 'real world' operation.
11.2	The enhancement of an existing element or the introduction of a 'sustaining technology' to an already operational component, sub-system or system is conceived. Commencement of applied research.
11.3	<i>Continue TRL progressions as before...</i>

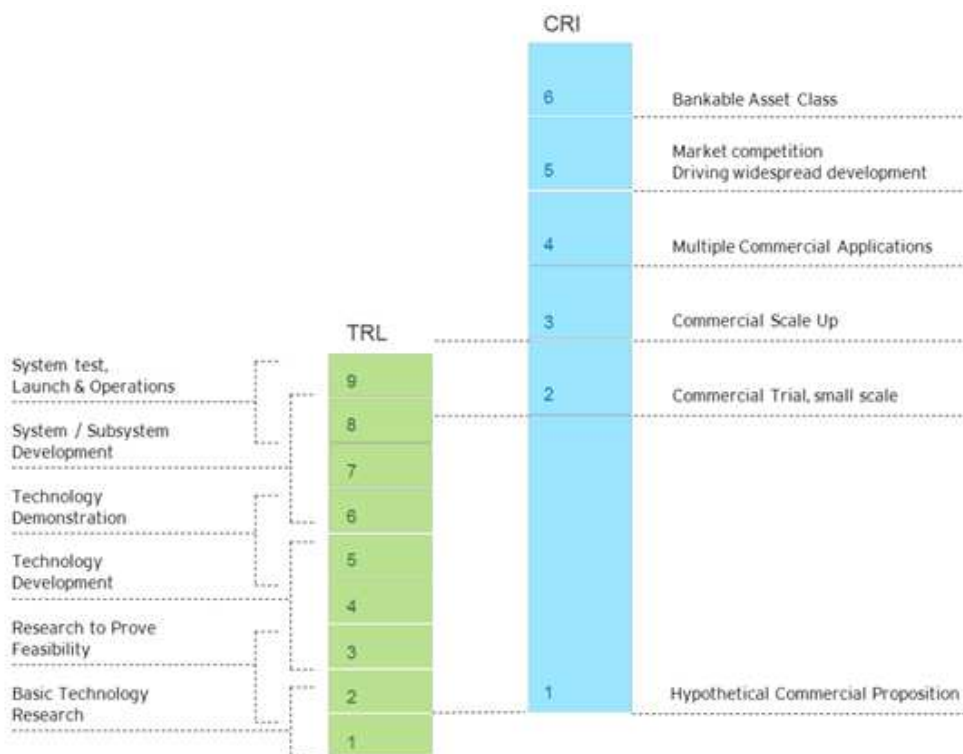
Fonte: Hicks (2009)

Straub (2015) sinaliza que mesmo nas aplicações no setor aeroespacial, o modelo de TRL com 9 níveis possui limitações para capturar as fases iniciais depois do início do uso do produto. Adicionalmente, Bakke (2017) ressalta que as duas propostas supracitadas são formas de fazer com que o processo de avaliação favoreça também aspectos comerciais.

Na Austrália, para lidar com esse desafio relacionado a viabilidade comercial, foi criado pela Agência de Energia Renovável Australiana (ARENA) o *Commercial Readiness Index* (CRI) (AUSTRALIAN RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2014), Figura 41. O desafio que ARENA (2014) almejava resolver era que o risco permanecia depois que a tecnologia atingia o TRL 9. Então eles criaram o CRI baseado nos 6 níveis que mensuram a maturidade da tecnologia a partir de arranjos financeiros do seu desenvolvimento. Dois desses níveis coexistem com os TRLs, e os outros últimos 4 vão além do TRL 9 (HÉDER, 2017). Além disso, há dois componentes no CRI: o resumo do *status* e oito indicadores para cada nível.

Segundo Héder (2017) o CRI foi desenvolvido considerando o mercado de energia renovável, mas ele pode também ser utilizado em outros setores. A Figura 41 ilustra comparativamente as escalas TRL e CRI.

Figura 41: Comparativo TRL e CRI



Fonte: ARENA (2014)

Por fim, instituições como DOE (2011) utilizam uma ferramenta que auxilia na identificação do nível de maturidade de uma determinada tecnologia, a *TRL Calculator*, Figura 42.

Figura 42: Calculadora TRL

AFRL Transition Readiness Level Calculator, version 2.2

Summary

Reset All

Use Manufacturing: No Manufacturing Use Programmatic No Programmatic

Hide Blank Rows:

Green set point is: 100% Yellow set point is: 67% Change set points on Summary sheet

Hardware and Software Calculator

Technology Readiness Level Achieved: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Technical: 0 1 2 3

Hardware & Software: 0 1 2 3

% Complete is now set at: 100%

Reset Level: 2

TRL 2 (Check all that apply or use slider for % complete)

HSW	Ques	Category	% Complete	Description
B	P		70	Customer identified
B	T		100	Potential system or component application(s) have been identified
B	T		80	Paper studies show that application is feasible
B	P		100	Know what program the technology will support
B	T		90	An apparent theoretical or empirical design solution identified
H	T		100	Basic elements of technology have been identified
B	T		90	Desktop environment
H	T		100	Components of technology have been partially characterized
H	T		100	Performance predictions made for each element
B	P		90	Customer expresses interest in application
S	T		100	Some coding to confirm basic principles
B	T		100	Initial analysis shows what major functions need to be done
H	T		100	Modeling & Simulation only used to verify physical principles

Fonte: DOE (2011)

O TRL Calculator foi desenvolvido pela U.S. Air Force Research Laboratory (AFRL). Essa calculadora pode ser confeccionada em uma planilha que contenha um compilado de perguntas que direcionam a avaliação do nível de maturidade tecnológica da tecnologia em análise. Uma vez que essas perguntas são respondidas, o *display* da calculadora indica em qual nível de maturidade que a tecnologia analisada se encontra. Uma ilustração da ferramenta para a análise se a tecnologia está em TRL 2 pode ser vista na Figura 42.

(iv) *Estratégia de utilização para a avaliação de desenvolvimentos que envolvem mais de uma tecnologia*

Entre as abordagens que ainda estão focadas em aspectos técnicos, mas que analisam de forma ampla a solução que será desenvolvida, pode-se citar o *Integration Readiness Levels* (IRLs), Tabela 6, e *System Readiness Levels* (SRLs), Tabela 7. Estas abordagens aparentam ter potencial para a avaliação de produtos complexos, que englobam mais de uma tecnologia e que demandam a realização de integrações entre diferentes partes que compõem o sistema.

O IRL consiste em uma escala que tem como objetivo mensurar a maturidade da integração entre dois ou mais componentes, Tabela 6. Essa escala juntamente com os TRLs formam a base para o desenvolvimento do SRL (GAO, 2020). Segundo o GAO (2020) a utilização da escala IRL auxilia na identificação de áreas que demandam algum desenvolvimento adicional, além de prover meios para reduzir o risco envolvido na maturação e integração dos componentes em um sistema.

A escala SRL está relacionada às tecnologias individuais (TRLs) e seus pontos de integração com outras tecnologias (IRLs), que irão contribuir para o desenvolvimento do sistema. À medida em que vão se estabelecendo as integrações no sistema, há o aumento de sua maturidade, que é mensurada através dos níveis de 1 a 9 que são abordados na escala SRL, Tabela 7.

Tabela 6: *Integration Readiness Level (IRL)*

IRL	Definition	Evidence Description
0	No integration	No integration between specified components has been planned or intended
1	A high-level concept for integration has been identified.	Principle integration technologies have been identified Top-level functional architecture and interface points have been defined High-level concept of operations and principal use cases has been started
2	There is some level of specificity of requirements to characterize the interaction between components	Inputs/outputs for principal integration technologies/mediums are known, characterized and documented Principal interface requirements and/or specifications for integration technologies have been defined/drafted
3	The detailed integration design has been defined to include all interface details	Detailed interface design has been documented System interface diagrams have been completed Inventory of external interfaces is completed and data engineering units are identified and documented
4	Validation of interrelated functions between integrating components in a laboratory environment	Functionality of integrating technologies (modules/functions/assemblies) has been successfully demonstrated in a laboratory/synthetic environment Data transport method(s) and specifications have been defined
5	Validation of interrelated functions between integrating components in a relevant environment	Individual modules tested to verify that the module components (functions) work together External interfaces are well defined (e.g., source, data formats, structure, content, method of support, etc.)
6	Validation of interrelated functions between integrating components in a relevant end-to-end environment	End-to-end Functionality of Systems Integration has been validated Data transmission tests completed successfully
7	System prototype integration demonstration in an operational high-fidelity environment	Fully integrated prototype has been successfully demonstrated in actual or simulated operational environment Each system/software interface tested individually under stressed and anomalous conditions
8	System integration completed and mission qualified through test and demonstration in an operational environment	Fully integrated system able to meet overall mission requirements in an operational environment System interfaces qualified and functioning correctly in an operational environment
9	System integration is proven through successful mission proven operations capabilities	Fully integrated system has demonstrated operational effectiveness and suitability in its intended or a representative operational environment Integration performance has been fully characterized and is consistent with user requirements

Fonte: GAO (2020)

Tabela 7: *System Readiness Level (SRL)*

Level	SRL Definition
9	System has achieved initial operational capability and can satisfy mission objectives
8	System interoperability should have been demonstrated in an operational environment
7	System threshold capability should have been demonstrated at operational performance level using operational interfaces
6	System component integrability should have been validated
5	System high-risk component technology development should have been complete; low-risk system components identified
4	System performance specifications and constraints should have been defined and the baseline has been allocated
3	System high-risk immature technologies should have been identified and prototyped
2	System materiel solution should have been identified
1	System alternative materiel solutions should have been considered

Source: GAO presentation of NSA SRA Handbook SRL information. | GAO-20-48G

Fonte: GAO (2020)

(v) *Detalhamento da escala*

Conforme dito anteriormente, segundo a EARTO (2014) a apresentação simplificada da escala TRL pode acabar dificultando a comunicação entre os envolvidos na utilização da escala (como proponentes e avaliadores de projetos), em vez de facilitá-la. Com o objetivo de deixar isso mais claro, a EARTO fez um comparativo para cada nível, com a leitura e definições que são de seu entendimento, Quadro 22.

Quadro 22: Detalhamento da escala TRL utilizada pelo programa *Horizon 2020*

Cluster	TRL	H2020 terminology	EARTO reading	EARTO definition and description
Invention	TRL1	Basic principles observed	Basic principles observed	Basic scientific research is translated into potential new basic principles that can be used in new technologies
	TRL2	Technology concept formulated	Technology concept formulated	Potential application of the basic (technological) principles are identified, including their technological concept. Also the first manufacturing principles are explored, as well as possible markets identified. A small research team is established to facilitate assessment of technological feasibility.
Concept validation	TRL3	Experimental proof of concept.	First assessment of feasibility of the concept and technologies	Based on preliminary study, now actual research is conducted to assess technical and market feasibility of the concept. This includes active R&D on a laboratory scale and first discussions with potential clients. The research team is further expanded and early market feasibility assessed.
	TRL4	Technological validity in a lab	Validation of integrated prototype in a laboratory	Basic technological components are integrated to assess early feasibility by testing in a laboratory environment. Manufacturing is actively researched, identifying the main production principles. Lead markets are engaged to ensure connection with demand. Organisation is prepared to enter into scale up, possible services prepared and a full market analysis conducted.
Prototyping and incubation	TRL5	Technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of KETs)	Testing of the prototype in a user environment	The system is tested in a user environment, connected to the broader technological infrastructure. Actual use is tested and validated. Manufacturing is prepared and tested in a laboratory environment and lead markets can test pre-production products. First activities within the organisation are established to further scale up to pilot production and marketing
Pilot production and demonstration	TRL6	Technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of KETs)	Pre-production of the product, including testing in a user environment	Product and manufacturing technologies are now fully integrated in a pilot line or pilot plant (low rate manufacturing). The interaction between the product and manufacturing technologies are assessed and fine-tuned, including additional R&D. Lead markets test the early products and manufacturing process and the organisation of production is made operational (including marketing, logistics, production and others).
	TRL7	System prototype demonstration in an operational environment.	Low scale pilot production demonstrated	Manufacturing of the product is now fully operational at low rate, producing actual commercial products. Lead markets test these final products and organisational implementation is finalized (full marketing established, as well as all other production activities fully organized). The product is formally launched into first early adopter markets.
Initial market introduction	TRL8	System completed and qualified	Manufacturing fully tested, validated and qualified	Manufacturing of the product, as well as the product final version is now fully established, as well as the organisation of production and marketing. Full launch of the product is now established in national and general early majority markets.
Market expansion	TRL9	Actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of KETs; or in space)	Production and product fully operational and competitive	Full production is sustained, product expanded to larger markets and incremental changes in the product create new versions. Manufacturing and overall production is optimized by continuous incremental innovations to the process. Early majority markets are fully addressed.

Fonte: EARTO (2014)

No Brasil, uma iniciativa que também propôs um detalhamento na apresentação da escala foi o SibratecNANO, Quadro 23. Este programa utiliza de recursos da Finep para financiar projetos cooperativos entre micro, pequenas, médias e grandes empresas e Instituições Científica e Tecnológicas que fazem parte do SisNANO (Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias) (SISNANO, 2019).

Quadro 23: Estratégia de detalhamento da escala TRL preconizada pelo Sibratec Nano

NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA - TRL							
TRL	Descrição	Atividade	Objeto (foco)	Integração	Escala	Ambiente	Exemplo (Filmes ultrafinos para fabricação de dispositivos para sensores de gases "industriais")
1	Princípios básicos observados e reportados (O que já foi feito, observado ou definido)	Levantamento bibliográfico	Comportamento, características e propriedades essenciais	NA	NA	NA	Levantamento bibliográfico das restrições e disponibilidade dos materiais; Propriedades dos polímeros escolhidos: condutividade, estabilidade, biocompatibilidade; Escolha do substrato : tipo de interação com o polímero; Técnica de fabricação do filme . Exemplo
2	Formulação de conceitos tecnológico e/ou de aplicação	Levantamento bibliográfico e simulações	Princípios científicos da aplicação	NA	NA	Desktop	Seleção das técnicas de caracterização e de fabricação do sensor (aplicação) utilizando o material de interesse (filme ultrafino). Previsão da performance do sensor. Exemplo
3	Estabelecimento de função crítica de forma analítica ou experimental e/ou prova de conceito	Verificação das premissas do TRL 2	Funções críticas dos componentes individuais	Componentes individuais	NA	Laboratorial	Verificação em laboratório das funções críticas dos materiais. Exemplo
4*	Validação funcional dos componentes em ambiente de laboratório	Validação; Levantamento; Simulação	Funcionalidades básicas da tecnologia; Requisitos gerais para a aplicação final; interface entre os componentes .	Componentes integrados parcialmente	Laboratorial	Laboratorial	Fabricação dos filmes em laboratório e validação de sua funcionalidade como sensor. Exemplo
5*	Validação das funções críticas dos componentes em ambiente relevante	Validação	NA	Componentes integrados	Planta piloto ou similar	Relevante	Produção do sensor em escala piloto e validação de sua funcionalidade em ambiente similar ao industrial. Exemplo
6*	Demonstração de funções críticas do protótipo em ambiente relevante	Simulação; Demonstração	Desempenho da tecnologia e viabilidade de fabricação	Protótipo	Planta demonstrativa ou similar	Operacional	Produção do protótipo em escala demonstrativa e simulação em ambiente industrial. Exemplo
7	Demonstração de protótipo do sistema em ambiente operacional	Demonstração	Atingimento dos requisitos operacionais e especificações	Protótipo completamente integrado	Real	Operacional (condições de estresse e anômalas)	Produção do protótipo em escala real e avaliação do seu desempenho (escalabilidade, gerenciabilidade, segurança, tempo de resposta) em ambiente industrial. Exemplo
8	Sistema qualificado e finalizado	Qualificação	NA	Produto ou processo final	NA	NA	Qualificação do produto final pelo Órgão responsável.
9	Sistema operando e comprovado em todos os aspectos de sua missão operacional	Comercialização	NA	Produto ou processo final	NA	Real	Comercialização.

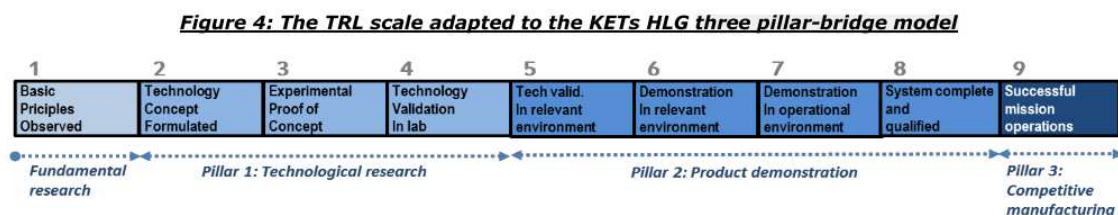
*Nível de maturidade tecnológica dos projetos apoiados pelo SibratecNano.

Fonte: SisNANO (2019)

(vi) Agrupamento entre os níveis de maturidade tecnológica

A Figura 43 foi elaborada por um grupo de *experts* em TPGs, os quais recomendaram que a escala fosse utilizada como ferramenta de avaliação dos resultados e expectativas dos projetos. O agrupamento foi proposto considerando o modelo de três pilares sob os quais foi construída a estratégia europeia para as TPGs: (i) pesquisa tecnológica, (ii) demonstração de produtos e (iii) atividades de manufatura competitivas (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

Figura 43: Escala TRL utilizada pela Comissão Europeia



Fonte: Comissão Europeia (2012)

O Banco Europeu de Investimento (BEI) também adotou uma abordagem similar, fazendo a distinção entre quatro grupos: (i) Investigação (TRL1-3); (ii)

Desenvolvimento (TRL 3-6); (iii) Inovação (TRL6-8) e (iv) Apoio à Produção (TRL9). Diante disso, conclui-se que a distinção entre os nove níveis de maturidade pode ser considerada como muito granular e o agrupamento para classificações mais amplas pode contribuir para uma aplicação mais prática da ferramenta (EARTO, 2014).

APÊNDICE B - *Template* preliminar gerado com base nas literaturas estudadas

O *template* preliminar gerado com base nas literaturas de NT e CP possui 10 macro-elementos de complexidade: Tamanho, interações e interdependências, tecnologia, *stakeholders*, divisão do trabalho, objetivos e metas propostas, gestão do projeto, globalização e contexto, fluxo do desenvolvimento e negócio e mercado.

Cada uma destes macro-elementos foram desdobrados de forma a elucidar o que os compõem de acordo com a literatura supracitada. Ao todo foram encontrados 50 desdobramentos, chamados de micro-elementos. Cada um deles foi inserido logo abaixo do macro-elemento de complexidade associado ao mesmo. Vale ressaltar que alguns deles estão associados a mais de um macro-elemento de complexidade.

Quadro 24: Template teórico (BLOCO A) de elementos de complexidade gerado a partir das literaturas de NT e CP

ELEMENTOS DE COMPLEXIDADE	AUTORES NA LITERATURA
TAMANHO: <i>Tamanho da estrutura organizacional, tamanho do sistema que está sendo desenvolvido, tamanho e duração do projeto, entre outros.</i>	Vidal e Marle (2008); Geraldí, Maylor e Willians (2010); Gidado (2010); Kim e Willeman (2003)
<ul style="list-style-type: none"> Muito tempo demandado para o desenvolvimento - Inovações demoram de 10-15 anos até gerar um produto comercial. 	Maine (2016)
<ul style="list-style-type: none"> Demanda por muito recurso ao longo dos anos - Grande injeção de recursos financeiros durante muitos anos sem segurança sobre o retorno. 	Maine e Seegopaul (2016); Gidado (2010)
<ul style="list-style-type: none"> Muitos mercados são possíveis - Dificuldade em especificar um mercado/foco reduz a capacidade de execução; Necessidade de customizar cada aplicação/funcionalidade para cada mercado e comprovar em escala. 	McGahn (2005); Maine e Seegopaul (2016)
<ul style="list-style-type: none"> Necessidade de envolver várias instituições e pessoas ao longo do desenvolvimento - Necessidade de co-desenvolvimento ou o estabelecimento de alianças com conhecedores do mercado. 	Maine (2013a); Brockmann e Girmscheid (2007); Baccarini (1996)
<ul style="list-style-type: none"> Muitas variáveis técnicas envolvidas - Grande número de variáveis influenciam os fenômenos em escala nanométrica. 	Di Sai (2020); Brockmann e Girmscheid (2007)
INTERAÇÕES E INTERDEPENDÊNCIAS: <i>Interdependências entre elementos do projeto (sistemas, subsistemas), entre pessoas, organizações, atividades do cronograma e entre inputs e outputs.</i>	San Cristóban et al. (2018); Geraldí, Maylor e Willians (2010); Gidado (2010); PMI (2014); Pollack e Remington (2010); Vidal e Marle (2008); San Cristóban et al. (2018).
<ul style="list-style-type: none"> Dependência de outras tecnologias/inovações -Necessidade/dependência de inovações complementares 	Maine e Garnsey (2006); Maine (2013c); Maine e Seegopaul (2016); Maine (2013c);
<ul style="list-style-type: none"> Variáveis técnicas são interdependentes e essa interdependência influencia diversos aspectos do desenvolvimento tecnológico - Grande número de variáveis influenciam os fenômenos em escala nanométrica; alterações mínimas no processo de fabricação resultam em mudanças significativas nas propriedades do produto. 	Di Sai (2020); Linton e Walsh (2008)

<ul style="list-style-type: none"> • Dependência de alinhamento com outras empresas/instituições que tenham acesso ao mercado - Necessidade de co-desenvolvimento ou o estabelecimento de alianças com conhecedores do mercado. 	Maine (2013a); Maine (2013c); Baccacini (1996)
<ul style="list-style-type: none"> • Dependência da injeção de recursos por várias instituições ao longo dos muitos anos de desenvolvimento - Grande injeção de recursos financeiros durante muitos anos sem segurança sobre o retorno. 	Maine e Seegopaul (2016)
<ul style="list-style-type: none"> • Para viabilizar a inovação em NT as pessoas precisam de entender do que se trata - Pouca experiência/conhecimento dos potenciais clientes em relação a nanotecnologia; Dificuldade de compreensão dos potenciais clientes sobre as soluções nanotecnológicas. 	Belcher et al. (2013); Maine (2013a)
<p>TECNOLOGIA: <i>Diferentes graus de complexidade tecnológica pode afetar o potencial de comercialização e performance financeira. A complexidade tecnológica está associada a: diversidade de tarefas, múltiplos aspectos associados a uma tarefa (como vários inputs e outputs), quantidade de envolvidos em sua execução técnica (como por exemplo, subcontratações), diversidade de funções de um produto e de tecnologias vinculadas a ele, diversidade de bases de conhecimentos necessários o desenvolvimento do produto, velocidade na qual o desenvolvimento tecnológico é feito, interdependência entre as especificações do produto e seu grau de inovação.</i></p>	Cheah et. al (2021); PMI (2014); Gidado (2010); Pollack e Remington (2010); Baccarini (1996); Gerald, Maylor e Williams (2011)
<ul style="list-style-type: none"> • Muitas variáveis envolvidas e qualquer alteração pode afetar consideravelmente os aspectos técnicos do desenvolvimento - Grande número de variáveis influenciam os fenômenos em escala nanométrica; Forte influência da estrutura no processo de produção; Inovação baseada em processo (process-based innovation); alta sensibilidade dos nanomateriais a variações mínimas diversas (ex: variações térmicas, pureza dos precursores, entre outras). 	Linton e Walsh (2008); Di Sai (2020); Maine, Lubik e Garnsey (2012) ; Maine (2013c); Belcher et al. (2013); Gidado (2010); Tatikonda e Rosenthal (2000); Ward e Chapman (2003)
<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade na realização do <i>scale-up</i> de produção - Dificuldades e incertezas atreladas a viabilidade do <i>scale-up</i>; muitas variáveis para controlar no <i>scale-up</i>. 	Tsusuki (2016); Belcher et al (2013); Maine, Probert e Ashby (2005); Maine e Seegopaul (2016); Maine (2013b); Ward e Chapman (2003); Remington et al. (2009)
<ul style="list-style-type: none"> • Caracterização - Acesso a equipamentos de caracterização adequados. 	Richman e Hutchinson (2009); Belcher et al (2013)

<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades associadas à mudança do rumo do desenvolvimento e/ou testagem de abordagens alternativas - Dificuldade em pivotar, comparado a desenvolvimentos tecnológicos em outras áreas; Desafios de realizar experimentos de alta fidelidade com baixo custo e prazo. 	Boren, Chan e Musso (2012); Maine (2013b); Maine (2013c)
<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade na definição do foco do desenvolvimento tecnológico - Necessidade de balancear a possibilidade de múltiplos mercados com os investimentos necessários até encontrar uma aplicação viável; Caráter genérico das tecnologias que possibilita a aplicação em múltiplos mercados. 	Maine (2006); Maine e Garnsey (2006); Belcher et al. (2013)
<ul style="list-style-type: none"> • Muita incerteza tecnológica e comercial durante muito tempo - Obstáculos e incertezas regulatórias durante o desenvolvimento tecnológico e comercialização dos produtos; Inovações demoram de 10-15 anos até gerar um produto comercial. 	Kaur et al. (2014); Maine (2016)
<p>STAKEHOLDERS: <i>Quantidade e variedade de participantes, relações e comunicação entre os participantes, visibilidade dos envolvidos (do projeto ou de pessoas politicamente sensíveis), comportamento e expectativas das pessoas envolvidas, nível de compreensão dos stakeholders sobre o projeto.</i></p>	PMI (2014); Pollack e Remington (2010); Geraldi, Maylor e Williams (2011); Gidado (2010); San Cristiban et al (2018)
<ul style="list-style-type: none"> • Os negócios são baseados em ciência, logo é necessário entender sobre nanotecnologia para fazê-los: Pouca experiência/conhecimento dos potenciais clientes em relação a nanotecnologia; Dificuldade de compreensão dos potenciais clientes sobre as soluções nanotecnológicas. 	Belcher et al. (2013); Maine, Lubik e Garnsey (2012); Maine (2013a); PMI (2014)
<ul style="list-style-type: none"> • Grande quantidade e diversidade de stakeholders envolvidos para colocar recurso e compartilhar o risco do desenvolvimento - Grande injeção de recursos financeiros durante muitos anos sem segurança sobre o retorno; Dependência de grandes empresas e governos para o aporte de investimentos; métodos convencionais de financiamento para empresas em NT são inviáveis (ex: capital de risco) 	Maine e Seegopaul (2016); Freeman (1997); Maine (2013b)
<ul style="list-style-type: none"> • Dependência de várias instituições durante o processo de desenvolvimento - Necessidade de co-desenvolvimento ou o estabelecimento de alianças com conhecedores do mercado; Necessidade/dependência de inovações complementares. 	Maine (2013a); Maine e Garnsey (2006); Maine e Garnsey (2012); Maine (2013b)

<ul style="list-style-type: none"> Desafios associados à insegurança em aspectos regulatórios e SMS - Obstáculos e incertezas regulatórias durante o desenvolvimento tecnológico e comercialização dos produtos. 	Kaur et al. (2014); Maine (2013b).
<ul style="list-style-type: none"> Diferença de expectativas entre os stakeholders 	PMI (2014)
<p><i>DIVISÃO DO TRABALHO:</i> Seleção da equipe que irá executar o projeto, forma de dividir as tarefas entre os membros da equipe, pressão durante a operacionalização do cronograma, presença de diferentes profissionais com backgrounds distintos.</p>	San Cristóban et al. (2018); PMI (2014); Baccarini (1996)
<ul style="list-style-type: none"> Necessidade de co-desenvolvimento ou o estabelecimento de alianças com conhecedores do mercado. 	Maine (2013a); Maine e Garnsey (2012); Maine (2013b); Gidado (2010)
<ul style="list-style-type: none"> Dificuldades de comunicação devido à realização de trabalhos complementares em localidades distintas. 	San Cristóban et al. (2018); PMI (2014); Kim e Willemon (2003)
<p><i>OBJETIVOS E METAS PROPOSTAS:</i> Incerteza em relação às metas e objetivos previstos, dificuldade de alcançá-los (e.g. metas agressivas, cronograma longo).</p>	Dao et al. (2016); PMI (2014); Geraldi, Maylor e Williams (2011)
<ul style="list-style-type: none"> Deficiências no estabelecimento de métricas que podem ser utilizadas para acompanhar a evolução do desenvolvimento tecnológico - Não possuir indicadores irrefutáveis que evidenciem a remoção do risco ao longo do tempo; Não possuem heurísticas para medir o aumento de valor quando algum risco é superado; Grande injeção de recursos financeiros durante muitos anos sem segurança sobre o retorno (inclusive sem segurança no como medi-lo ao longo do tempo). 	Belcher et al. (2013) ; Maine e Seegopaul (2016)
<ul style="list-style-type: none"> Desafios associados à insegurança em aspectos regulatórios e SMS - Obstáculos e incertezas regulatórias durante o desenvolvimento tecnológico e comercialização dos produtos. 	Kaur et al. (2014); Maine (2013b)
<ul style="list-style-type: none"> Metas mais ambiciosas. 	Maine (2013b); Dao et al. (2018)
<ul style="list-style-type: none"> Dificuldades no planejamento vinculadas às especificações dos objetivos e metas. 	Ahern, Byrne e Leavy (2014)
<p><i>GESTÃO DO PROJETO:</i> Variedade de métodos e ferramentas de gerenciamento aplicados no projeto, o quão adequado estão as estratégias de gestão das interfaces e da comunicação entre os envolvidos.</p>	PMI (2014); ICCPM (2022); Dao et al. (2016); Vidal e Marle (2014); San Cristoban et al (2018)
<ul style="list-style-type: none"> Problemas na gestão dos desenvolvimentos - Deficiências na gestão de desenvolvimentos em nanotecnologia e na interação entre diferentes atores da cadeia de valor. 	Naseri e Davoodi (2011); Kim e Willemon (2003)

<ul style="list-style-type: none"> ● Necessidade de adaptação de métodos e técnicas aplicáveis a esta área - Não aplicabilidade de técnicas tradicionais de pesquisa de mercado; Utilização do método <i>spiral product development</i> para desenvolvimento de produtos. 	Bennett (2008); Belcher et al. (2013); Franco (2023); Maine (2013c); Unger e Eppinger (2002)
<ul style="list-style-type: none"> ● Dificuldades em relação a definição da melhor estratégia de proteção da propriedade intelectual - Dificuldade em definir a abrangência adequada da proteção da propriedade intelectual; Busca pelo patenteamento da forma mais ampla possível. 	Belcher et al. (2013); Maine (2013a)
<ul style="list-style-type: none"> ● Gestão de riscos associados a SMS na manipulação e utilização de nanomateriais – necessidade de frameworks norteadores para esta área e dependência de pesquisas em andamento. 	NNI (2019); ACS (2021); Yoshioka, Tsutsumi e Kosuma (2016); Maine (2013a); Khunei et al. (2016)
<ul style="list-style-type: none"> ● Deficiências em relação a definição indicadores de processo do desenvolvimento. 	Belcher et al. (2013) e Maine (2013c)
<ul style="list-style-type: none"> ● Dificuldades de comunicação relacionada às assimetrias de conhecimentos entre pesquisadores e agentes do mercado 	Belcher et al. (2013) e Maine (2013b)
<ul style="list-style-type: none"> ● Adoção da engenharia simultânea 	San Cristobal et al (2018)
<p>GLOBALIZAÇÃO E CONTEXTO <i>Dispersão geografia do time do projeto, do(s) cliente(s), fornecedor(es) e outros stakeholders. Pluralidade de elementos envolvidos no projeto, diferentes culturas, ambiguidades na comunicação, interações entre diferentes instituições e grupos com interesses distintos.</i></p>	<i>Vidal e Marle (2008); Pollack e Remington (2010); San Cristóbal et al (2018);</i>
<ul style="list-style-type: none"> ● Caráter genérico das tecnologias que possibilita a aplicação em múltiplos mercados. 	Maine e Garnsey (2006); McGahn (2005)
<ul style="list-style-type: none"> ● Posição a montante (<i>upstream</i>) na cadeia de valor. 	Maine (2016)
<ul style="list-style-type: none"> ● Fragmentação da cadeia de valor - Complexidade da cadeia de valor. 	Boren (2012)
<ul style="list-style-type: none"> ● Desenvolvimentos mais suscetíveis ao Vale da Morte 	Belcher et al.(2013)
<ul style="list-style-type: none"> ● Métodos de financiamento tradicionais para empresas de tecnologia (ex: capital de risco) não veem nanotecnologia como atrativo devido à demora no retorno financeiro. 	Maine (2013a)
<ul style="list-style-type: none"> ● Contexto regulatório mundial sobre nano segurança. 	ACS (2021); Yoshikoa, Tsutsumi; Kazuma (2016); Kuhnel et al. (2016); Maine (2013b); Pollack e Remington (2010); Gerald, Maylor e Williams (2011).

<ul style="list-style-type: none"> • Diferenças culturais em relação a linguagem, fuso horário distinto. 	San Cristóban et al. (2018); Cristóbal (2017); Brockmann e Girmscheid (2007)
<ul style="list-style-type: none"> • Distanciamento geográfico entre a equipe executora e outros stakeholders. 	Vidal e Marle (2008); San Cristóban et al. (2018); Geraldi e Adbrecht (2007)
<ul style="list-style-type: none"> • Projeto politicamente sensível 	San Cristóban et al. (2018)
<p>FLUXO DO DESENVOLVIMENTO: <i>Necessidade de realizar mudanças e adaptações para atender a motivações e fatores externos (mudanças políticas ou de mercado) ou internos diversos (mudanças na estratégia do projeto e comportamento dos indivíduos).</i></p>	San Cristóban et al, (2018); Pollack e Remington (2010); Kim e Willemin (2003); Geraldi, Maylor e William (2011)
<ul style="list-style-type: none"> • Como há muitos potenciais mercados, definir um mercado específico para iniciar é algo difícil - Caráter genérico das tecnologias que possibilita a aplicação em múltiplos mercados; Necessidade de focar em um mercado inicial estratégico (mercados de substituição e de menor risco) que não necessariamente é o mais rentável e o de real interesse. 	Maine e Garnsey (2006); Maine, Lubik e Garnsey (2012a); Maine e Seegopaul (2016)
<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades associadas à mudança do rumo do desenvolvimento e/ou testagem de abordagens alternativas - Dificuldade em pivotar, comparado a desenvolvimentos tecnológicos em outras áreas; Desafios de realizar experimentos de alta fidelidade com baixo custo e prazo. 	Boren, Chan e Musso (2012); Maine (2013b); Geraldi, Maylor e William (2011)
<p>NEGÓCIO E MERCADO: <i>Aspectos que influenciam a definição e execução do modelo de negócios, a estratégia comercial e a inserção dos produtos no mercado.</i></p>	Maine e Garnsey (2006); Geraldi, Maylor e William (2011)
<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades em relação a comercialização de propriedade intelectual; dificuldades e demora no processo de licenciamento de tecnologia. 	Belcher et al. (2013); Rambaran e Schirhagl (2022)
<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades em relação a definição da melhor estratégia de proteção da propriedade intelectual - Dificuldade em definir a abrangência adequada da proteção da propriedade intelectual; busca pelo patenteamento da forma mais ampla possível. 	Belcher et al. (2013); Maine (2013a)

<ul style="list-style-type: none"> ● Caráter genérico das tecnologias que possibilita a aplicação em múltiplos mercados – iniciar por mercados de substituição para depois migrar para mercados emergentes. 	Maine e Garnsey (2006); Maine, Ludvik e Garnsey (2012); Maine (2013b); Maine (2013c).
<ul style="list-style-type: none"> ● Muitos mercados são possíveis - Dificuldade em especificar um mercado/foco reduz a capacidade de execução; Necessidade de customizar cada aplicação/funcionalidade para cada mercado e comprovar em escala. 	McGahn (2005); Maine e Seegopaul (2016); Belcher et al (2013)
<ul style="list-style-type: none"> ● Os negócios são baseados em ciência, logo é necessário entender sobre nanotecnologia para fazê-los: Pouca experiência/conhecimento dos potenciais clientes em relação a nanotecnologia; Dificuldade de compreensão dos potenciais clientes sobre as soluções nanotecnológicas. 	Belcher et al. (2013); Maine, Lubik e Garnsey (2012); Maine (2013a); Maine (2013b); Pisano (2010); Carter et al (2003)
<ul style="list-style-type: none"> ● Dependência de outras tecnologias/inoações - Necessidade/dependência de inovações complementares. 	Maine e Garnsey (2006); Maine (2016); Maine e Seegopaul (2016)
<ul style="list-style-type: none"> ● Necessidade de adaptação de métodos e técnicas aplicáveis a esta área - Não aplicabilidade de técnicas tradicionais de pesquisa de mercado; Utilização do método <i>spiral product development</i> para desenvolvimento de produtos. 	Bennett (2008); Belcher et al. (2013)
<ul style="list-style-type: none"> ● Cadeia de valor incompleta. 	Chain (2015)
<ul style="list-style-type: none"> ● Inovações baseadas em alterações no processo – demanda estratégias de comercialização diferenciadas. 	Maine, Lubik e Garnsey (2012); Utterback (1994)

Fonte: A autora (2023)

APÊNDICE C - *Template* gerado pelos codificadores independentes com base nos dados empíricos

Com o objetivo de garantir a confidencialidade dos entrevistados e dos projetos abordados nas entrevistas, conforme acordado previamente a realização das entrevistas, foram tomados os seguintes cuidados na transcrição das falas obtidas nas entrevistas para o presente documento:

- (i) Todas as falas literais que citavam explicitamente o nome da empresa financiadora, tiveram o nome da empresa financiadora trocado genericamente por somente “empresa”;
- (ii) Todas as falas literais que citavam o nome/título do projeto, tiveram o nome do projeto trocado por somente “projeto”;
- (iii) Todas as falas literais que citavam o nome de algum coordenador, supervisor, interlocutor do projeto, tiveram o nome trocado genericamente por “coordenador”, “supervisor”, “interlocutor”.

Estas alterações foram realizadas somente para evitar qualquer desconforto na apresentação deste conteúdo no documento final da tese, pois todas as análises dos dados foram feitas (tanto pelos CIs quanto pela pesquisadora da tese) utilizando das falas literais, sem as substituições supracitadas.

Conforme explicado no tópico 6.1, os 58 micro-elementos de complexidade identificados pelos CIs estão apresentados no Quadro 24 na coluna “Complexidade identificada pelos CIs”. Estes micro-elementos foram agregados em 13 macro-elementos, apresentados no Quadro 24 na coluna “Dimensão agregada definida pelos CIs”. Além disso, o Quadro 24 mostra também os recortes das falas dos entrevistados, considerando as substituições supracitadas, que foram a base para a codificação dos micro-elementos de complexidade. Foi adotada tal estrutura para a apresentação do *template* de codificação dos CIs para que ficasse clara a utilização da estrutura de agrupamento de dados baseada nos artigos de Corley e Gioia (2004), Gioia, Corley e Hamilton (2013) e Kidd (2008), ver Figura 13.

Por fim, vale ressaltar que houve falas dos entrevistados que foram associadas a mais de um micro-elemento de complexidade, por serem consideradas como significativas

para ilustrar a presença de mais de uma complexidade. Logo, a repetição de algumas das falas é algo que respalda, inclusive, que em determinadas situações há a presença simultânea de mais de uma complexidade.

Quadro 25: Template empírico (Bloco B) da codificação realizada pelos CIs

FALA DO ENTREVISTADO QUE REMETE A UMA COMPLEXIDADE IDENTIFICADA NO PROJETO	COMPLEXIDADE IDENTIFICADA PELOS CIS	DIMENSÃO AGREGADA DEFINIDA PELOS CIS
A parte mais complexa é fazer a proposta técnica de algo que não conhecíamos direito.	Know-how para o escrever uma proposta de projeto	Complexidade Tecnológica
Uma que eu destacaria nossa falta de conhecimento prévio, know-how, de experiência, expertise na área de membranas. Não só de membranas, mas até em tratamento de água, algo mais geral. Nos materiais, especificamente, a gente não tinha um contexto de trabalho muito sólido. Daí acho que isso afetou de alguma forma prospecção, apesar de ter sido bem-sucedido, porque tem uma dificuldade a mais você conseguir prospectar, discutir, aprovar algo que você não tem a mesma bagagem pra você conseguir conversar com os outros interlocutores.	Know-how para o escrever uma proposta de projeto	
Então, pra mim, desde a captação, o maior desafio pessoal nesse projeto é o tema científico tecnológico.	Know-how para o escrever uma proposta de projeto e executar	
Projeto solicitado, muito diferente de outros trabalhos que já trabalhei, ele foi solicitado por um gerente geral da empresa, no momento que estávamos implantado outro projeto.	Know-how para o escrever uma proposta de projeto e executar	
O fato do CT Nano nunca ter trabalhado com barreira de gás. Então, apesar da gente ter uma experiência prévia com Epóxi, a gente se deparou com uma situação nunca antes avaliada pela equipe.	Know-how para o escrever uma proposta de projeto e executar	
Difícil ter contato também em algumas, não todas as linhas de pesquisa, mas em algumas linhas, na parte mais acadêmica mesmo, também faltava contato. Não tinha tanta história como no Brasil de desenvolvimento.	Know-how para o escrever uma proposta de projeto	
Na execução também, por não ter experiência prévia, demorou até criar ali um know-how que pudesse favorecer um desenvolvimento mais dinâmico do projeto,	Know-how para o desenvolvimento do projeto	

ainda mais que na pandemia também dificultou os trabalhos experimentais, que precisam de muito trabalho experimental.		
A gente teve dificuldades do ponto de vista de pessoal, com a equipe técnica, de ter gente que a gente esperava que fosse mais capacitada pra fazer aquilo e não era, não se mostrou à altura em termos de formação para aquela área, pra trabalhar com aquelas coisas.	Know-how para o desenvolvimento do projeto	
A falta de informação pra trabalhar com esse material que também eles também nem sabiam e, na época, não tinha ninguém que tinha o pré-conhecimento de como trabalhar com esses materiais aqui.	Know-how (do CTNano e do parceiro) para o desenvolvimento do projeto	
Os outros colaboradores não tinham conhecimentos suficientes para poder avançar nas atividades.	Know-how para o desenvolvimento do projeto	
Se a gente tivesse que mudar a rota seria complicado demais, porque se não tivéssemos algo crítico disponível aqui, a gente teria que comprar, e o tempo corre, mudar demanda tempo, então isso se torna um problemão.	Dificuldades atreladas à pivotagem (acesso a infraestrutura, equipamentos, insumos, esforço demandado)	
Qualquer coisinha que você muda no processo, na manipulação, afeta um ou mais parâmetros. E geralmente piora, então é fácil alterar algo sem querer alterar, e atrapalhar outras coisas que nem imaginávamos.	Muitas variáveis para controlar	
A gente brincava que não poderíamos nem respirar diferente perto do equipamento que estava fazendo a medida, porque é tudo muito sensível.	Grande influência entre as variáveis técnicas	
Se o nanotubo já viesse com um nível de funcionalização ou resíduo ou qualquer coisa do tipo diferente do lote que a gente usava, isso afetava fortemente a tinta e, como consequência, o sensor.	Influência de características nanomaterial para a nanoaplicação	
A ausência de um profissional ou profissionais com toda a competência técnica necessária pra execução desse projeto é o maior desafio dele também.	Know-how para o desenvolvimento do projeto	
Esse material deu origem depois a uma complexidade extra que a gente não havia previsto no início do projeto. E foi a complexidade de uma vez que já tinha esses	Dificuldades na caracterização de material	

materiais em mãos, fazer as caracterizações que a gente queria fazer... Não tínhamos nem equipamento que desse pra fazer isso. Foi muito mais difícil do que a gente imaginou que seria na fase de planejamento.	e acesso a infraestrutura para caracterização	
Outro ponto é o tempo. Eu entendo que o tempo da academia e o tempo da indústria são coisas diferentes. Mas normalmente a gente precisa de mais tempo pra poder fundamentar cada vez mais.	Know-how para o desenvolvimento do projeto	
Os relacionamentos têm sido bastante complexos também. Até por essa questão, a barreira tecnológica é tão grande que os conflitos acontecem por ausência de competência para executá-lo.	Desafios técnicos influenciam na gestão de pessoas	
Teve falha na hora de caracterizar por parte de gente da frente de caracterização do CT, que tem que atender todo mundo, então não tão comprometidos com ninguém, no final das contas.	Falhas técnicas na caracterização	
Reprodutibilidade do processo exige parâmetros bem controlados.	Reprodutibilidade do processo	
Do ponto de vista técnico, foi um projeto desafiador pelo volume de material que a gente teria que entregar pra empresa, que era algo sem precedentes até então. Foram 40 quilos de materiais produzidos!	Escalabilidade	
Produção em escala é um dos maiores desafios, foi a operação dos equipamentos, que era muito demandada neste projeto, e como algumas partes eram importadas, tem-se essa limitação para repor rapidamente e voltar para o sistema operar a curto prazo.	Escalabilidade	
(...) tínhamos que escalonar e manter a reprodutibilidade do processo, que exige parâmetros bem controlados.	Escalonamento do processo	
Antes de fechar o projeto, foram realizados testes antes sem custo da empresa, para prever os gastos para entrega.	Dificuldade de precificação do projeto	
Acho que essa questão da falta de um histórico do que já foi desenvolvido pelo Centro e pode ser utilizado por outros grupos, eu acho que é um grande gargalo (...) E dependendo de como que o povo saí, de demissão e tal, eles não querem repassar o histórico. Aí a gente sai refazendo coisas na marra, porque não consegue reproduzir o que tinham dito que dava certo, por falta de conhecimento sobre isso.	Gestão do conhecimento técnico	Complexidade para Gestão do conhecimento

Seria bom se tivesse um relatório, ou algo do tipo, do CTNano de metodologias técnicas do que é realizado dentro do CT, pois existe uma dificuldade de manter os pesquisadores.	Gestão de conhecimento técnico	
Antes da minha entrada, os processos que estavam sendo conduzidos pelo pós-doc, na época, eles eram processos que estavam saindo da cabeça do pós-doc. Ele não utilizou o know-how do CT Nano em termos de dispersão de nanomaterial, ele fez do zero, como se não tivesse nada desenvolvido antes...	Gestão de conhecimento técnico	
Atraso e tempo muito longo para o processo de compras, com prazos de entrega muito altos.	Gestão de compras	Complexidade para a realização de aquisições
No processo de compras era um bate e volta infernal, era difícil, inclusive, saber quem que era o real responsável pelas coisas dentro da fundação.	Gestão de compras	
A parte de serviço, de construção de moldes, que era necessário fazer alguns testes, também demorou muito, tanto por demora interna nossa de compra na fundação, mas depois também de demora porque a empresa disse que ia fazer, mas prolongou muito pra fazer o que era necessário.	Gestão de compras	
Se você já comprou os equipamentos críticos a ela, no final ela não é tão problemática, né? Mas se você tem um projeto certo, em que você precisa de um equipamento crítico, esse equipamento atrasa, o impacto é alto. Então você acha que depende um pouco do tipo de projeto, do tipo de equipamento que você está.	Gestão de compras	
Toda mudança experimental, exigia um grande tempo para a aquisição de compras pela fundação, quase 60 dias pra ter o que foi pedido na mão.	Gestão de compras	
A parte de serviço, de construção de moldes, que era necessário fazer alguns testes, também demorou muito, tanto por demora interna nossa de compra na fundação, mas depois também de demora porque a empresa disse que ia fazer, mas prolongou muito pra fazer o que era necessário.	Gestão de compras	
Compra de material muito moroso, porque dependia da atuação de várias pessoas da fundação, a compra do principal equipamento para o desenvolvimento do estudo foi efetivada só após nove meses e o projeto tinha 1 ano e meio.	Gestão de compras	

Outra dificuldade que a gente tem é com compras. A importação tem um tempo grande de três, quatro meses para aquisição dos materiais e, dependendo também da época, a fundação está sobrecarregada e acaba que até compras simples demoram muito pra serem executadas.	Gestão de compras	
Insumos com justificativa técnica ainda demanda mais tempo, aí tem gente que julga e que questiona coisas tecnicamente sem sentido. E cada hora é um, então a gente fica perdido.	Gestão de compras	
Compras de insumos, dependendo de mil pessoas da fundação atrasam muito.	Gestão de compras	
O tempo é muito longo pra qualquer coisa. Então, levar meses pra insumos muito simples, meses sendo meses que eu falo, quatro, cinco meses de coisas que vêm e vai indo	Gestão de compras	
Tivemos que fazer a fundação, pois a primeira não tinha priorização e as compras demoraram seis meses.	Gestão de compras	
Produção em escala um dos maiores desafios, foi a operação dos equipamentos, que era muito demandada neste projeto, e como algumas partes eram importadas, tem-se essa limitação para repor rapidamente e voltar para o sistema operar a curto prazo	Gestão de compras (importação e manutenção)	
As compras de membranas comerciais para comparação, foi bem difícil pela fundação, falha no processo o tempo todo.	Gestão de compras	
Implementação, gestão inércia da universidade, fundações, empresa, burocracia.	Gestão de compras	
Teve quebra de equipamento várias vezes durante o projeto. Uma das peças que quebrou era um tubo de quartzo, que só era produzido na China e teria que ser importado via fundação ainda, ou seja, um tempão para ter um novo. Então a gente tinha que torcer pra não quebrar durante o projeto.	Gestão de compras (importação)	
Quando o projeto é mais desenvolvido, mais maduro, demanda mais da empresa parceira, principalmente testes em campo, principalmente com empresas grandes.	Evolução na maturidade tecnológica	Complexidade na relação com os parceiros
Até hoje não testamos o gás da própria empresa que não forneceu o gás para testar. Tem o risco do gás real não ser real do que estamos testando.	Dependência de terceiros para o desenvolvimento	

<p>Eu acho que a primeira complexidade que eu vejo é principalmente se tratando de uma empresa grande. É a interlocução, né? Ou seja, a gente, as empresas estão sempre querendo fazer projetos, tem sempre esse discurso de fazer projetos. A gente senta com o interlocutor, faz o projeto, às vezes, o projeto é aprovado e aí a empresa, no final, ela mesma não está preparada para dar suporte ao próprio projeto que ela está financiando.</p>	<p>Interlocução com empresa</p>	
<p>Teste internamente, teve também pra caracterizar a aplicação dos resultados. Isso demorou mais que o previsto. Foi um tempo mega maior! E a demora, um tempo prolongado pra conseguir o resultado do teste de aplicação, obviamente dificultou também os movimentos seguintes. A gente não tem a resposta, a gente não tem muita base de dados pra ver quais são os passos seguintes. Então a gente pode não ter um melhor aproveitamento do tempo possível.</p>	<p>Demora no teste de aplicação no parceiro</p>	
<p>A gente teve uma dificuldade muito grande com um acesso ao que a empresa havia prometido ou se comprometido a fornecer no início do projeto. Então a principal dificuldade que a gente teve foi, num primeiro momento, a empresa entregar no prazo o que ela tinha que ter entregado no prazo correto, que foram aquelas placas lá para caracterizar.</p>	<p>Acesso ao material advindo de fornecedores da empresa financiadora</p>	
<p>A falta de dinâmica da empresa também atrapalhava bastante. Lembro o tormento que foi pra receber as placas pra poder fazer esse levantamento de características dos materiais pra aí poder delinear o que a gente estava querendo fazer.</p>	<p>Engajamento da empresa parceira e informações sobre os materiais fornecidos</p>	
<p>A maior dificuldade no projeto foi justamente o fato da empresa ter assumido executar todos os ensaios que nos orientaram em relação à performance dos revestimentos que estão sendo desenvolvidos e ela não ter realizado, então a gente fica sem saber que rota é a melhor pra seguir.</p>	<p>Engajamento da empresa parceira</p>	

<p>O projeto contemplava a produção do material no CT e alguns testes e validação na empresa. Só que essa segunda etapa nunca aconteceu. Então, a gente acabou tendo que produzir materiais às cegas, porque a empresa não foi capaz de fornecer um feedback sobre o que que a gente estava produzindo para eles durante o período do projeto.</p>	<p>Engajamento da empresa parceira</p>	
<p>A supervisora entrou no meio do projeto literalmente pra apagar incêndio, pra apresentar resultado que não existia e não por parte por falta de empenho da equipe, mas por um atraso de quatro meses na entrega das amostras por parte da empresa.</p>	<p>Engajamento da empresa parceira</p>	
<p>Do ponto de vista técnico, a gente teve bastante, tá tendo bastante dificuldade de executar esse projeto, porque como teve uma mudança da equipe da empresa e esse projeto era prioritariamente pra ser feito em campo, a gente não conseguiu acesso, conseguiu apenas um acesso à empresa.</p>	<p>Engajamento e entendimento da empresa parceira</p>	
<p>Na parte técnica a celulose que a empresa ia enviar teve uma burocracia muito grande para envio, então tivemos que fazer com a que tinha, que nem era do parceiro, que está longe do ideal, mas é o que dava para fazer.</p>	<p>Engajamento e entendimento da empresa parceira</p>	
<p>Direcionar a pesquisa para problematização que eles trouxeram, muitas vezes o foco do entupimento, mas eles falam de desgaste, impacto e tudo mais, então precisa de um direcionamento</p>	<p>Entendimento da empresa parceira</p>	
<p>A falta de informação pra trabalhar com esse material que também eles também nem sabiam e, na época, não tinha ninguém que tinha o pré-conhecimento de como trabalhar com esses materiais aqui.</p>	<p>Entendimento da empresa parceira</p>	
<p>E no final teve mais um problema, um dos interlocutores pediu para a gente fazer uma amostra diferente. Então a gente acabou gastando, entregando mais do que tinha sido proposto no projeto.</p>	<p>Entendimento da empresa parceira</p>	
<p>Estão querendo substituir o grafite por um grafite funcionalizado. Quando você funcionaliza, você coloca defeitos no material, então você prejudica a resistência, ele vai oxidar mais fácil quando exposto à temperatura, que não é algo desejável pra aplicação deles. Então assim, claro que você pode mexer na superfície, integração, formas pra que isso possa ser positivo. Mas a princípio tinha uma</p>	<p>Seleção conjunta de materiais para desenvolver o projeto</p>	

dificuldade relevante pro objetivo proposto por seleção de materiais para aquele objetivo. A própria empresa não sabia auxiliar direito nisso...		
Eles forneceram material de qualidade ruim, a celulose não era na prática do que eles falavam.	Entendimento da empresa parceira	
Projeto solicitado, muito diferente de outros trabalhos que já trabalhei, ele foi solicitado por um gerente geral da empresa, no momento que estávamos implantado outro projeto.	Entendimento da empresa parceira	
A empresa não entendeu o P&D que era básico, pra eles parecia fácil chegar no produto final ao final de um projeto.	Entendimento da empresa parceira	
Outro ponto é o tempo. Eu entendo que o tempo da academia e o tempo da indústria são coisas diferentes. Mas normalmente a gente precisa de mais tempo pra poder fundamentar cada vez mais.	Entendimento da empresa parceira	
Da empresa, ainda teve o desastre de Brumadinho no meio desse período. Inclusive, com um dos interlocutores morrendo. Depois disso, mudou um pouco a equipe da empresa que ia contratar o projeto. Mudou o tempo todo. Ou seja, as pessoas não ficavam lá, cada hora a gente tinha que conversar com alguém diferente. Pareceu "cão sem dono".	Mudanças na empresa parceira	
A mudança da empresa para a empresa que a comprou (ocorreu uma fusão entre empresas) também foi um indicador de dificuldade, o projeto ficou "perdido" lá dentro durante um tempo, e olha que eles já tinham colocado dinheiro.	Mudanças na empresa parceira	
Um outro ponto muito complicado do projeto foi o relacionamento com o CT, o fato de a gente não ser contratado diretamente da empresa. O fato do projeto ter sido contratado de um intermediário.	Relação jurídica entre os envolvidos	
Menos sensação de urgência para desenvolver um produto funcional, em relação com a empresa, que não demonstra essa necessidade, por serem da pesquisa também e não dá ponta do produto final.	Senso de urgência e distanciamento do fornecedor do produto a ser melhorado	
A gente está trabalhando com o Centro de Pesquisa da empresa, que é empresa gigantesca e que não está lá na ponta querendo comercializar produto, igual a multinacional responsável por isso. Então eu acho que o fato de não pelos	Senso de urgência	

<p>interlocutores em si, que foram, foram ótimos pelo menos o meu contato até então. Não pelos interlocutores em si, mas pelo contexto de onde eles estão, que era de pesquisa de uma empresa enorme que não está na ponta da venda. Eu acho que isso gera menos pressão por desenvolvimento, focado em funcionalidade real ali, que funcione menos pressão, menos urgência, menos sensação de urgência mesmo pra você conseguir desenvolver um produto funcional.</p>		
<p>A dimensão o projeto que envolve número de pessoas envolvidas tanto do lado do CT para as empresas, banco, grandes dimensões maior projeto que coordenei, número de parceiros.</p>	<p>Grande número de parceiros</p>	
<p>Um outro ponto muito complicado foi o relacionamento com o CT, o fato de a gente não ser contratado diretamente da empresa. O fato do projeto ter sido contratado de um intermediário.</p>	<p>Arranjo jurídico com mais instituições</p>	<p>Complexidade devido a quantidade de envolvidos e burocracias na contratação/ execução do projeto</p>
<p>Mudança de rubrica depende de caso a caso, reajustes de custeio, mudança de pessoal, capital, aditivo, que podem atrapalhar a gestão do projeto.</p>	<p>Gestão de recursos</p>	
<p>Burocracia, tempo de aprovação afetou muito, não por culpa da empresa, mas também porque eles aprovaram isso dentro da financiadora, né? Que demorou muito também a aprovação. Depois, liberação de recurso, o tempo entre uma conversa e iniciar o projeto demorou muito. Isso é muito prolongado.</p>	<p>Arranjo jurídico com mais instituições</p>	
<p>Burocracia na UFMG. A empresa demorava muito para aprovar um projeto, o que afeta a prospecção e até mesmo a execução do projeto, pois o tempo é muito grande para pesquisa porque muita coisa muda.</p>	<p>Burocracias na contratação e execução, envolvendo várias instituições</p>	
<p>Pra captar, depois de totalmente aprovado em todos os órgãos, nós passamos dois anos negociando com os jurídicos, dois anos, pra conseguir achar uma minuta de acordo de parceria.</p>	<p>Negociação com várias instituições</p>	
<p>A dimensão da burocracia que a gente teve que enfrentar desde o capital contratado e depois toda a execução até hoje, é algo assim, que ultrapassa em muito o que a gente consegue imaginar quando a gente faz uma proposta de projeto de P&D.</p>	<p>Burocracias na contratação e execução, envolvendo várias instituições</p>	

Implementação, gestão inércia da universidade, fundações, empresa, burocracia.	Gestão da implementação	
A maior dificuldade dele no início foi a assinatura, tanto da parte do interlocutor da empresa quanto da UFMG, não tinha prazo, era ad infinitum.	Burocracia na contratação, envolvendo aprovação de várias instâncias	
Negociar plano de trabalho foi complicado, mas não foi pior que o processo de assinatura tanto pro lado da empresa quanto pro lado da UFMG, sendo a universidade mais demorado e descentralizado	Burocracia na contratação, envolvendo aprovação de várias instâncias	
Mudança de fundação, pois a primeira não tinha priorização e as compras demoraram seis meses.	Burocracia nas alterações feitas durante a execução, envolvendo aprovação de várias instâncias/instituições	
A dimensão o projeto que envolve número de pessoas envolvidas tanto do lado do CT para as empresas, banco, grandes dimensões maior projeto que coordenei, número de parceiros.	Muitas instituições/instâncias envolvidas na contratação e execução do projeto	
A supervisora entrou no meio do projeto para apagar incêndio, para apresentar resultado que não existia, por causa de um atraso de meses não pela equipe, mas pela empresa que não entregou as amostras.	Gestão de pessoas e projetos	
Falta de comprimento de prazos por parte da equipe, algumas pessoas da equipe tem dificuldade de cumprir os prazos, o gerenciamento fica impactado.	Gestão de pessoas e projetos	
Compromisso de alguns membros da equipe no compromisso para os entregáveis	Gestão de pessoas e projetos	
Agora, um dos gargalos que nós enfrentamos aí você pode depois estender aos três projetos. É a demora na caracterização de algumas amostras. Principalmente análises de TG. Isso impactou principalmente no projeto.	Gestão de pessoas e projetos	Complexidades na gestão de recursos humanos

Demora na caracterização de algumas amostras na análise de TG (feitas por outra equipe do CTNano).	Gestão de pessoas e projetos	
Falha na hora de caracterização por um funcionário do CTNano (faz parte de outra equipe do CTNano).	Gestão de pessoas e projetos	
Faltou um planejamento, um alinhamento das estratégias com os objetivos ficou meio solto, sem cobrir o que são totalmente necessários.	Gestão estratégica de planejamento	
Tinha alguém que era superior, que era intermediário entre o coordenador e eu pesquisadora, este intermediário não conseguia fazer que as coisas fluíssem tanto a parte científica quanto a burocrática.	Gestão de pessoas e projetos	
Os relacionamentos têm sido bastante complexos também. Até por essa questão, a barreira tecnológica é tão grande que os conflitos acontecem por ausência de competência para executá-lo.	Gestão de pessoas e projetos	
Uma equipe enorme trabalhando de professores, de supervisores, de contratados de todos os níveis. Projeto com 50 a 60 pessoas, os contratados, mais os professores.	Gestão de grande quantidade de envolvidos na execução do projeto	
Eu como gestora, eu posso buscar as pessoas adequadas e fazer o projeto andar. Eu não tenho background não, não acho que é o problema maior. Agora é a dificuldade de encontrar pessoas como o background.	Complexidade na contratação de pessoal qualificado/background	
Busca de pessoas externas no país.	Complexidade na contratação de pessoal qualificado/background	
Não tinha dinheiro para pagar equipe direito, não tinha como pagar equipe dedicada, o que complica o desenvolvimento.	Previsão de orçamento	
A ausência de um profissional ou profissionais com toda a competência técnica necessária para execução desse projeto é o maior desafio dele também.	Complexidade na contratação de pessoal qualificado/background	

<p>A gente teve dificuldades do ponto de vista de pessoal, com a equipe técnica, de ter gente que a gente esperava que fosse mais capacitada pra fazer aquilo e não era, não se mostrou à altura em termos de formação pra aquela área, pra trabalhar com aquelas coisas.</p>	<p>Gestão de pessoal</p>	
<p>Quando demite alguém que não quer passar informações sobre o que já foi feito antes, a gente perde tempo demais. Isso foi muito estressante e desgastante, fora o retrabalho né. Quando acontece demissão e a pessoa sai com raiva, dificulta tudo para quem fica.</p>	<p>Gestão de pessoal</p>	
<p>A troca de financiamento da empresa para cnpq, dificultou encontrar equipe capacitada para o projeto por ser um tema muito específico que exige um trabalho muito minucioso dentro do laboratório, a dificuldade de encontrar um pesquisador com este perfil que estivesse disposto a receber o valor da bolsa pago pelo cnpq, foi um grande limitante</p>	<p>Complexidade na retenção de pessoal qualificado/background</p>	
<p>No momento inicial de gestão, acho que também a situação com dinheiro. Era um projeto que tinha recurso pequeno, então, além de afetar compra de material, serviço, contratação de serviço, alocação de gente, eu acho que ele acaba assim, na prática, ali não priorizado por todas as pessoas envolvidas, até de gestão mesmo, né, a coordenação do centro (...) querendo ou não, se a gente tem projetos robustos, grandes e importantes, altamente desafiadores, e tem um outro com recurso muito menor, ele acaba não tendo a mesma priorização interna.</p>	<p>Priorização de projetos</p>	
<p>Os projetos seriam muito mais tranquilos se a gente tivesse uma equipe estável.</p>	<p>Complexidade na retenção de pessoal qualificado/ background</p>	
<p>Como é um projeto de universidade tinha que ficar de olho no recurso, para o dinheiro não ser destinado a outras pessoas que não faziam parte do projeto.</p>	<p>Conflito de interesses na alocação interna do recurso financeiro</p>	<p>Complexidades para a destinação dos recursos financeiros</p>
<p>Teve toda a dificuldade inerente de todos os projetos nos últimos anos, que foi o projeto com essa empresa, suspensão de pagamento de parcela, pandemia, suspensão de execução.</p>	<p>Conflito de interesses na alocação do recurso financeiro pelo parceiro</p>	

<p>A empresa decide que ela não vai mais fazer investimentos do porte que ela vinha fazendo com a gente, e em 2018, suspende uma série de projetos e prorroga o pagamento de parcela. Por outro lado, o banco suspende o pagamento de outra parcela. Aí complica pra gente em relação ao planejamento feito.</p>	<p>Conflito de interesses na alocação do recurso financeiro pelo parceiro</p>	
<p>A gente precisou recorrer a infraestruturas que não estavam previstas no início e que a gente teve que recorrer ao instituto tecnológico da empresa para eles auxiliarem a gente no corte daqueles cortes de corpos de prova.</p>	<p>Infraestrutura externa</p>	
<p>Depois, construção de prédio, dois anos pra conseguir licença ambiental. Até hoje nós estamos lutando com licenciamento ambiental. Então, coisas que ultrapassam a execução técnica, né?</p>	<p>Regularização de infraestrutura</p>	<p>Complexidades para ter a infraestrutura disponível e manter a existente operacional</p>
<p>A gente construiu uma infraestrutura, mudou pra uma infraestrutura nova.</p>	<p>Construção de infraestrutura</p>	
<p>É a necessidade de uma infraestrutura, ou seja, de um forno e acessórios de que não estão disponíveis nem no Brasil nem no mundo, né? Nas características que a gente precisa.</p>	<p>Aquisição de equipamentos</p>	
<p>Teve quebra de equipamento várias vezes durante o projeto. Uma das peças quebrou era um tubo de quartzo, que só era produzido na China e teria que ser importado via fundação ainda.</p>	<p>Manutenção de infraestrutura</p>	
<p>Lidar com uma transição que é externa a nós, de uma situação onde a gente tinha um governo desenvolvimentista que aprovou o projeto, um governo que queria um desenvolvimento nacional de fronteira pra uma mudança a partir de uma mudança política dramática em toda a, vamos dizer, a dinâmica de P&D da maior empresa parceira, da Petrobras, a partir de 2015 e 2016, a diminuição de financiamentos, a suspensão de pagamentos de parcela.</p>	<p>Longa duração influenciada por transições políticas</p>	<p>Complexidades vinculadas ao tamanho do projeto</p>
<p>E ainda por cima, teve a pandemia.</p>	<p>Contexto externo</p>	

Esse projeto envolveu muitos anos, muito recurso, muita gente e muita burocracia.	Tamanho do projeto	
Pedido da empresa para fazer uma projeção de custo para o processo em escala industrial do material que estamos enviando para ele.	Projeção de custos para ver viabilidade de comercialização	Complexidade em relação aos aspectos mercadológicos /comerciais
Fazer uma projeção de quais mercados você poderia atuar com algo que você nem se quer desenvolveu é fora da realidade e sem sentido.	Projeção de mercado para a tecnologia que ainda não foi desenvolvida	
E ainda por cima, teve a pandemia.	Contexto externo	Complexidades devido ao contexto
Lidar com uma transição que é externa a nós, de uma situação onde a gente tinha um governo desenvolvimentista que aprovou um projeto, um governo que queria um desenvolvimento nacional de fronteira pra uma mudança a partir de uma mudança política dramática em toda a, vamos dizer, a dinâmica de P&D da maior empresa parceira, da Petrobras, a partir de 2015 e 2016, a diminuição de financiamentos, a suspensão de pagamentos de parcela.	Longa duração influenciada por transições políticas	
Por não ter experiência prévia demorou ter o dinamismo na parte técnica o afetou muito a parte técnica inclusive pela pandemia.	Contexto externo	
Não ter contato direto com uma empresa que tem o material que será aditivado, é fornecedor de fornecedor.	Arranjo entre os players da cadeia	Complexidades na cadeia de valor
O produto não era do processo fabril da empresa foi também uma dificuldade que aumenta o tempo do desenvolvimento.	Inserção na cadeia de valor	
Que não tem empresa fabricante no Brasil, dificuldade de buscar um terceiro para um desenvolvimento industrial.	Inserção na cadeia de valor	
Faltou um planejamento, um alinhamento das estratégias com os objetivos ficou meio solto, sem cobrir o que são totalmente necessários	Gestão estratégica de planejamento	Complexidades no planejamento do projeto e que afetaram a execução
Uma complexidade que a gente tinha grande foi que não tinha dinheiro pra executar o orçamento foi... o supervisor, acho que colocou muito pra baixo o orçamento. Então, aí o dinheiro impacta em tudo, inclusive para você conseguir direcionar mais esforços para aquilo.	Gestão financeira	

<p>Acho que faltou conversar um pouco mais do detalhamento técnico, das possibilidades de desenvolvimento do projeto. Ficou um pouco solto, assim, os objetivos gerais. Acho que se tivesse algum alinhamento desde a prospecção e depois na execução, de quais objetivos, materiais, possibilidades... poderia ter tido um resultado, ou melhor, ou então mais ágil, mais robusto.</p>	<p>Alinhamento com parceiro</p>	
<p>O tempo do projeto foi curto, para o desenvolvimento de testes e otimização da execução do projeto.</p>	<p>Tempo de duração do projeto</p>	
<p>Também tem impacto relacionado com o tempo, com a equipe, com o prazo, mas que ficou meio que só um teste conceito de aplicação mesmo no final do projeto. Então a gente não teria tempo para fazer um teste inicial para depois ajustar a formulação. Testar o que está sendo desenvolvido ficou só no final.</p>	<p>Testagem do desenvolvimento</p>	
<p>No momento inicial de gestão, acho que também a situação com dinheiro. Era um projeto que tinha recurso pequeno, então, além de afetar compra de material, serviço, contratação de serviço, alocação de gente, eu acho que ele acaba assim, na prática, ali não priorizado por todas as pessoas envolvidas, até de gestão mesmo, né, a coordenação (...) querendo ou não, se a gente tem projetos robustos, grandes e importantes, altamente desafiadores, e tem um outro com recurso muito menor, ele acaba não tendo a mesma priorização interna.</p>	<p>Priorização de projetos</p>	

Fonte: A autora (2023)