

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

REINALDO BORSATO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA EM UM PROJETO DE P&D POR
MEIO DO *TECHNOLOGY READINESS LEVELS* (TRL)**

ITAJUBÁ – MG
2022

REINALDO BORSATO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA EM UM PROJETO DE P&D POR
MEIO DO *TECHNOLOGY READINESS LEVELS* (TRL)**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Administração.

Área de Concentração: Empreendedorismo e Inovação

Orientadora: Prof.^a Dra. Sandra Miranda Neves

ITAJUBÁ – MG
2022

REINALDO BORSATO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA EM UM PROJETO DE P&D POR
MEIO DO *TECHNOLOGY READINESS LEVELS* (TRL)**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Administração.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Sandra Miranda Neves (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá (Unifei)

Prof. Dr. Carlos Henrique Pereira Mello
Universidade Federal de Itajubá (Unifei)

Prof.^a Dra. Andréa Aparecida da Costa Mineiro
Universidade Federal de Itajubá (Unifei)

Prof. Dr. Alexandre Baratella Lugli
Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)

ITAJUBÁ – MG
2022

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema e causa primeira de todas as coisas;

Aos docentes da UNIFEI do programa de Mestrado Profissional em Administração, pela magnífica condução das disciplinas, carinho e dedicação com a docência mesmo neste momento mundial pandêmico tão adverso;

A Professora Sandra Miranda Neves, pela orientação, dedicação e todo auxílio para a condução deste trabalho;

A Professora Andréa Aparecida Mineiro, coordenadora do programa, por sua solicitude e ensinamentos;

A empresa Sense Eletrônica LTDA e ao gerente do departamento de P&D Sérgio Augusto Bertoloni, pela disponibilização de horários e por permitir a execução desta pesquisa tomando como base seus processos de gestão do departamento de Pesquisa e Desenvolvimento.

DEDICATÓRIA

A meus pais, Ana Lúcia e Reinaldo, que sempre me mostraram o caminho da retidão e incentivaram minha educação como sendo o melhor caminho para meu crescimento em todos os aspectos da vida e ao meu irmão Welington, amigo e companheiro de várias jornadas;

A minha esposa Marina, que me incentivou e vibrou pela minha luta diária mesmo nos momentos mais difíceis, sendo o alicerce que me permitiu adentrar e seguir no programa de mestrado;

A minha filha Maria, que nasceu durante a condução desta pesquisa e é a minha nova inspiração, amiga e razão do meu viver.

RESUMO

A metodologia *Technology Readiness Levels* (TRL), originada dentro do setor aeroespacial, vem sendo utilizada em projetos tecnológicos de elevada complexidade, principalmente em contextos em que o domínio da tecnologia ainda é incipiente. Possui escalas de nível tecnológico variando, originalmente, de 1 a 9, onde os níveis mais baixos estão ligados à pesquisa básica da tecnologia e os níveis mais altos estão ligados ao desenvolvimento de sistemas e subsistemas, tendo em vista o lançamento do produto ou tecnologia. Assim, esta pesquisa teve como objetivo analisar a implantação da metodologia TRL para a medição do nível de maturidade tecnológica das diversas etapas que compõem um projeto inovador de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) a partir da aplicação em uma empresa da área de automação industrial. O método de pesquisa adotado para a obtenção dos resultados pretendidos foi a pesquisa-ação, onde buscou-se identificar os TRLs de cada subconjunto avaliado de um projeto de desenvolvimento tecnológico de um sensor ultrassônico industrial a partir de dois ciclos iterativos. A ferramenta selecionada para a avaliação dos níveis de maturidade tecnológica foi a calculadora IMATEC. Um dos motivos para a seleção dessa calculadora foi por se encontrar disponível para uso geral, sendo acessada no sítio eletrônico da Agência Espacial Brasileira (AEB), ligada ao governo federal brasileiro. Como resultados obtidos a partir de ambos os ciclos iterativos, tem-se (a) obtenção dos níveis de prontidão tecnológica em cada uma das etapas sob análise e sua evolução dentro da janela temporal estudada; (b) quais são as tecnologias que compõem o desenvolvimento de um sensor ultrassônico industrial. As análises possibilitaram validar o estudo proposto por meio da aplicação e verificação dos resultados em um projeto de P&D real. Assim, a apresentação de possibilidades de novas aplicações para a metodologia TRL e a proposta de um novo processo integrado à metodologia de gestão da empresa objeto de estudo a partir da implantação do TRL, que pode vir a ser extrapolado para outros projetos, são importantes contribuições desta pesquisa.

Palavras-chave: Inovação; Pesquisa e Desenvolvimento (P&D); *Technology Readiness Levels* (TRL).

ABSTRACT

The Technology Readiness Levels (TRL) methodology, originated within the aerospace sector, has been used in highly complex technological projects, mainly in contexts where the domain of technology is still incipient. It has technological level scales ranging from 1 to 9, where the lowest levels are linked to basic technology research and the highest levels are linked to the development of systems and subsystems, with a view to launching the product or technology. Thus, this research aimed to analyze the implementation of the TRL methodology to assess the level of technological maturity of the various stages that make up an innovative Research and Development (R&D) project based on its application in a company in the industrial automation area. The research method adopted to obtain the intended results was the Action-Research, which sought to identify the TRLs of each subset evaluated of a technological development project of an industrial ultrasonic sensor from two iterative cycles. The tool needed to assess technological maturity levels was an IMATEC calculator. One of the reasons for selecting this calculator was because it is available for general use, being accessed on the website of the Brazilian Space Agency (AEB), linked to the Brazilian federal government. As results obtained from both iterative cycles, we have (a) obtaining the levels of technological readiness in each of the stages under analysis and its evolution within the time window studied; (b) what are the technologies that make up the development of an industrial ultrasonic sensor. The analyzes made it possible to validate the proposed study through the application and verification of the results in a real R&D project. Thus, the presentation of possibilities for new applications for the TRL methodology and the proposal of a new process integrated to the management methodology of the company object of study from the implementation of the TRL, which can be extrapolated to other projects, are important contributions of this research.

Keywords: *Innovation; Research and Development (R&D); Technology Readiness Levels (TRL).*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Breve Histórico sobre o TRL.....	22
Figura 2 - Países mais interessados no assunto e número de publicações entre 2011 e 2020..	24
Figura 3 - Quantidade de publicações entre 2011 e 2020.....	25
Figura 4 - Principais áreas do conhecimento dos estudos ligados a TRL e número de trabalhos publicados.....	26
Figura 5 - Principais Autores Citados.....	27
Figura 6- Mapa de palavras-chave e seu inter-relacionamento	28
Figura 7 - TRL Calculator	35
Figura 8 - Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1	36
Figura 9 - Calculadora AEB IMATEC.....	37
Figura 10 - Passos para implantação da pesquisa-ação como procedimento técnico.....	42
Figura 11 - Ciclos da Pesquisa-Ação.....	43
Figura 12 - Etapas do processo de desenvolvimento de produto na Sense (visão parcial)	44
Figura 13- Fluxo metodológico da pesquisa-ação.....	48
Figura 14 - Apresentação sistema e subsistemas.....	50
Figura 15 - Modelamento do Transformador de Acoplamento Eletroacústico (TAE).....	51
Figura 16 - Construção interna de um Transdutor Ultrassônico (TU)	52
Figura 17 - Modelamento básico do Transdutor Ultrassônico (TU)	53
Figura 18 - Vista explodida parcial TAE.....	54
Figura 19 - Montagem projeto PCI em ambas as faces.....	54
Figura 20 - Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica da Montagem TU.....	59
Figura 21 - Opções de microesferas de vidro	61
Figura 22 - Microesferas de vidro aglutinadas em imagem microscópica	62
Figura 23 - Cerâmica utilizada no projeto de P&D	63
Figura 24 - Transdutores ultrassônicos em processo de P&D.....	63
Figura 25 - Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica da Montagem TAE	64
Figura 26 - Evolução dos TAE.....	65
Figura 27 - Parâmetros núcleo de ferrite	66
Figura 28 - TAE finalizado.....	67
Figura 29 - Reavaliação TU.....	68
Figura 30 - Lote final do TU produzido e em estoque	69

Figura 31 - Avaliação do Projeto de PCI.....	70
Figura 32 - Texas Instruments BOOSTXL-PGA460	71
Figura 33 - Componentes da montagem TAE	72
Figura 34 - Sensor em teste na câmara anecoica	73
Figura 35 – Resultado do teste Emissão Conduzida em uma das condições estabelecidas pela norma	74
Figura 36 - Emissão radiada na polarização horizontal entre 30 a 230MHz.....	75
Figura 37 - Exemplo de funcionamento do IHM/HALL.....	76
Figura 38 – Resumo da implantação desta pesquisa-ação.....	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Definições originais do TRL.	19
Quadro 2. Definições TRL na ABNT NBR ISO 16290 (2015).	21
Quadro 3. Principais autores citados.	27
Quadro 4. Artigos com relação direta às questões de pesquisa estabelecidas.	29
Quadro 5. Síntese dos resultados, ferramentas ou análises utilizadas.	31
Quadro 6. Relação entre o TRL e as etapas do desenvolvimento do produto.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEB	Agência Espacial Brasileira
AFRL	<i>Air Force Research Laboratory</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
DoD	Departamento de Defesa dos EUA
EARTO	<i>European Association of Research And Technology Organisations</i>
EC	<i>European Comission</i>
EMBRAPII	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EMC/EMI	<i>Eletromagnetic Compatibility/Eletromagnetic Interference</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FAB	Força Aérea Brasileira (FAB)
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
INATEL	Instituto Nacional de Telecomunicações
LIT	Laboratório Integrado de Testes
MRL	<i>Manufacturing Readiness Levels</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
PMI	<i>Project Management Institute.</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
TAE	Transformador de Acoplamento Eletroacústico
TRL	<i>Technology Readiness Levels</i>
TU	Transdutor Ultrassônico
SPELL	<i>Scientific Periodicals Electronic Library</i>
WoS	<i>Web of Science</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Considerações Iniciais	14
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Justificativas	16
1.4 Estrutura da Pesquisa.....	17
1.5 Publicações Geradas	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 <i>Technology Readness Levels</i> (TRL).....	19
2.2 Contextualização da aplicação do TRL.....	23
2.3 Métodos de avaliação do TRL e seus desafios.....	34
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
3.1 Objeto de estudo	39
3.2 A pesquisa-ação	40
3.2.1 Planejamento da pesquisa-ação	44
3.2.2 Coleta de dados	45
3.2.3 Análise dos dados e planejamentos das ações.....	46
3.2.4 Implementação da ação	46
3.2.5 Avaliação de resultados.....	47
3.2.6 Monitoramento	47
3.2.7 Fluxo metodológico da pesquisa-ação	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Fase exploratória: apresentação da situação-problema (pré-passo)	49
4.2 Fase exploratória: apresentação da tecnologia (pré-passo).....	51
4.3 Coleta de dados e questões estruturadas para a avaliação do TRL	55
4.4 Fase de ação: primeiro propósito.....	59
4.5 Fase de ação: segundo propósito	67
4.6 Análise dos resultados e monitoramento.....	77
5. CONCLUSÃO	79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE I – Produção Técnica Tecnológica GUIA TRL adaptado ao ciclo de vida de desenvolvimento de produto.....	86
APÊNDICE II – Artigo publicado	87

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Segundo Hannigan, Seidel e Yakis-Douglas (2018), as empresas que conduzem o desenvolvimento de novos produtos tornam-se "painéis de pressão da informação" onde é frequente a falta de um fluxo de informações adequado dentro das organizações para a gestão do desenvolvimento de produtos tecnologicamente inovadores.

Normalmente, quanto mais inovadora uma empresa for, maior será sua competitividade e melhor sua posição no mercado em que atua. Essa alta capacidade para inovar transforma ideias em produtos, serviços e processos inovadores de forma rápida e eficiente (CARVALHO; REIS; CAVALCANTE, 2011). Ter meios para averiguar a evolução do nível de prontidão tecnológica de desenvolvimento de um produto tecnologicamente inovador aparenta ser algo pertinente nesse contexto.

O nível de maturidade de tecnologia, ou *Technology Readiness Levels* (TRL), foi desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para permitir a avaliação da maturidade de uma determinada tecnologia e a comparação consistente de maturidade entre os diferentes tipos de tecnologias em desenvolvimento, ou seja, é uma escala utilizada para dar suporte à tomada de decisão (ANPEI, 2017).

As escalas de nível tecnológico que compõem o TRL variam, originalmente, de 1 a 9, onde os níveis mais baixos estão ligados à pesquisa básica da tecnologia e os níveis mais altos estão ligados ao desenvolvimento de sistemas e subsistemas, tendo em vista o lançamento do produto ou tecnologia.

No contexto brasileiro, é possível utilizar o TRL para identificar os níveis de maturidade tecnológica dos projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) inscritos em um determinado instrumento de fomento.

A Lei 11.196/2005, também chamada de Lei do Bem, foi a lei que regulamentou os incentivos fiscais. Tal lei dispõe sobre incentivos fiscais para a inovação tecnológica e dispõe, também, sobre outras questões tributárias e outros regimes especiais de tributação (OLIVEIRA; ZABA; FORTE, 2017). Em seu Capítulo III, a Lei do Bem aborda que podem ser beneficiadas as fases de um projeto que podem ser interpretadas com TRL variando de níveis entre 1 a 7, com exceção de atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) retroativo, que se enquadram em uma escala de TRL 8.

De acordo com o manual de operações da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII, 2020), que apoia projetos de PD&I com recurso não-reembolsável, os projetos fomentados devem necessariamente estar classificados entre 3 e 6 na escala de TRL, assumindo, dessa forma, que não possuem nível de maturidade tecnológica suficiente para serem diretamente implantados, comercializados ou utilizados.

Outras agências de fomento como a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) também fazem referência ao nível de maturidade tecnológica em diferentes editais, conforme a natureza e o tipo do fomento.

Dada sua origem no setor militar, o TRL vem sendo adotado de forma consistente em projetos tecnológicos dessa área. Como exemplo, a Força Aérea Brasileira (FAB), por meio do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), realizou em dezembro de 2021 o lançamento para viabilizar o ensaio em voo do 14-X S, primeiro demonstrador brasileiro da tecnologia hipersônica aspirada, conhecida pela sigla em inglês *scramjet*, por meio da Operação Cruzeiro, onde foi averiguado que o TRL de nível 7 foi atingido (FAB, 2022).

Internacionalmente existem trabalhos publicados que tratam da avaliação do TRL em projetos inovadores. Por exemplo, Riordan *et al.* (2019) demonstraram uma abordagem de aplicação do TRL em uma validação laboratorial do projeto de um SONAR hidrográfico, onde o desenvolvimento foi conduzido em três fases mapeadas para marcos de avanço na escala TRL 3 até TRL 7.

Percebe-se, dessa forma, que o desenvolvimento de novos produtos tecnológicos apresenta deficiências, principalmente relacionadas à avaliação da gestão do risco tecnológico inerente ao processo de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Desse modo, buscar meios de mensurar e demonstrar o andamento do projeto em relação às etapas de maturidade tecnológica relacionadas ao desenvolvimento de novos produtos, principalmente quando a tecnologia para tal ainda não é dominada, parece fazer todo sentido para mitigar os riscos ligados ao processo de inovação de produtos.

Assim, tem-se como questões norteadoras para esta pesquisa: **(Q1)** A aplicação do TRL auxiliaria a gerir o andamento da evolução tecnológica durante o desenvolvimento de produtos, principalmente quando a empresa ainda não tem em plenitude o embasamento científico-tecnológico maduro e dominado para o desenvolvimento do produto? **(Q2)** A utilização da metodologia TRL poderia ser integrada aos processos de gestão já existentes como ferramenta complementar?

A partir das questões norteadoras da pesquisa foram estabelecidos os objetivos.

1.2 Objetivos

Tendo como base o contexto apresentado, o objetivo geral e os objetivos específicos foram estabelecidos.

O objetivo geral:

O objetivo deste trabalho é analisar a implantação da metodologia TRL para a medição do nível de maturidade tecnológica das diversas etapas que compõem um projeto inovador de P&D a partir da aplicação em uma empresa da área de automação industrial.

Os objetivos específicos são:

- Apresentar as contribuições da implantação da metodologia TRL em empresas de base tecnológica;
- Identificar em um projeto de P&D quais são os níveis de prontidão tecnológica em cada uma das etapas e quais são as tecnologias que compõem o seu desenvolvimento;
- Validar o estudo por meio da implantação e verificação de resultados em um projeto de P&D real de forma a integrar a metodologia aos processos de gestão de projetos já existentes na empresa, criando, assim, um novo processo.

A pesquisa foi conduzida por meio de uma pesquisa-ação desenvolvida na empresa Sense Eletrônica LTDA, empresa de base tecnológica da área de automação industrial e líder brasileira na área de sensores industriais.

Como delimitação da pesquisa têm-se que os atuais processos de gestão da empresa para o desenvolvimento de produtos já se encontram consolidados, assim o objetivo deste trabalho não é refazê-los ou apontar lacunas, mas sim propor a integração da metodologia TRL aos atuais processos de forma a permitir avaliar a maturidade e o desenvolvimento tecnológico dos produtos desenvolvidos.

1.3 Justificativas

Dadas as características previamente apontadas, sob os objetivos da pesquisa e seus desdobramentos, as justificativas que traduzem a motivação para a execução deste trabalho foram relacionadas:

- Relevância do tema: a metodologia TRL é baseada em normatização internacional que foi inicialmente formatada para a área aeroespacial e que vem tendo seu uso extrapolado para

diversas áreas ligadas ao desenvolvimento de produtos, principalmente com tecnologia de ponta;

- Relevância do objeto de estudo: a empresa objeto de estudo possui diversas tecnologias inovadoras cujo domínio de desenvolvimento e produção se dá por algumas companhias no mundo. A avaliação e análise do desenvolvimento dessas tecnologias pode vir a destacar o potencial competitivo de uma indústria brasileira com possível impacto mundial;
- Contribuição acadêmica da pesquisa: apresentação de possibilidades de novas aplicações para a metodologia TRL.
- Contribuição tecnológica: proposta de um novo processo integrado à metodologia de gestão da empresa a partir da implantação do TRL, que pode vir a ser extrapolado para outros projetos.

1.4 Estrutura da Pesquisa

Este trabalho está dividido em cinco Capítulos. O Capítulo 1 traz a introdução à pesquisa, apresentando o tema, questões de pesquisa, o objetivo geral, objetivos específicos e relevância do trabalho.

O Capítulo 2 contempla a fundamentação teórica, expondo a apresentação conceitual sobre o TRL, seguida de uma análise das publicações sobre o tema e exemplos de calculadoras que podem ser utilizadas para a análise do nível de maturidade tecnológica.

No Capítulo 3, Procedimentos Metodológicos, o objeto de estudo é apresentado assim como as etapas previstas para a condução da pesquisa-ação são enumeradas e explicitadas de acordo com a sequência de sua implementação.

O Capítulo 4 aborda os resultados e discussões, onde são detalhados os resultados obtidos no planejamento, coleta e análise dos dados e da implantação da pesquisa-ação por meio de ciclos iterativos divididos em propósitos.

O Capítulo 5, finalmente, apresenta as conclusões da pesquisa, seguido das referências bibliográficas e apêndice.

1.5 Publicações Geradas

A condução desta pesquisa fez com que duas publicações fossem geradas. A primeira publicação diz respeito à geração da produção técnica de um Processo/Tecnologia e Produto/Material não patenteáveis, a denominada Produção Técnica Tecnológica Guia-TRL Sense, apresentado no Apêndice I, sendo esse um instrumento capaz de atuar como ferramenta auxiliar para o cômputo do TRL.

A segunda publicação trata do artigo *Technology Readiness Levels (TRL) Aplicada à Análise do Nível de Maturidade Tecnológica de Projetos: Uma Revisão Sistemática e Bibliográfica de Literatura*, apresentado no XXIV SEMEAD - Seminários em Administração em novembro de 2021 que se encontra no Apêndice II.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 *Technology Readness Levels* (TRL)

Desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* - NASA na década de 1970, especificamente para a aplicação em materiais relativos aos sistemas espaciais, a metodologia TRL é uma poderosa ferramenta que tem como objetivo gerir os riscos tecnológicos que podem levar ao fracasso do desenvolvimento de um novo produto ou de uma nova tecnologia (NOLTE, 2011).

A NASA desenvolveu no ano de 1991 o primeiro Plano Integrado Tecnológico para o Programa Espacial Civil, no qual foi empregada a metodologia TRL para estudos e previsões, bem como avaliações tecnológicas (NASA, 2007).

Uma melhor explicação da metodologia só surgiu em 6 de abril de 1995, quando John Mankins, pesquisador da NASA, apresentou pela primeira vez os nove níveis de tecnologia com suas definições detalhadas, além de exemplos que são utilizados até os dias de hoje e que foram descritos no artigo *Technology Readness Levels – A White Paper* (ROCHA, 2017).

Visando trazer as definições originais de Mankins (1995) sobre os nove níveis do TRL ligado ao desenvolvimento de tecnologia espacial, o Quadro 1 foi elaborado.

Quadro 1. Definições originais do TRL

TRL	Definição	Estágio do Desenvolvimento	
1	Princípios básicos observados e reportados	Pesquisa básica da tecnologia	Estudo de viabilidade
2	Conceito tecnológico e/ou aplicação formulada		
3	Prova de conceito analítica e experimental de características e/ou funções críticas	Desenvolvimento tecnológico	
4	Verificação funcional de componente e/ou placa de ensaios em ambiente laboratorial		
5	Verificação da função crítica de componente e/ou placa de ensaios em ambiente relevante	Desenvolvimento de sistemas e subsistemas	Demonstração tecnológica
6	Demonstração do protótipo do sistema e/ou subsistema em um ambiente relevante na terra		
7	Demonstração do protótipo do sistema em um ambiente espacial		
8	Sistema real concluído e qualificado para voo por meio de teste e demonstração (solo ou espaço)		Sistemas testados, aprovados e prontos para lançamento
9	Sistema real comprovado em voo por meio de operações de missão bem-sucedidas		

Fonte: adaptado de Mankins (1995)

Um TRL mais alto significa que a tecnologia está mais próxima da aplicação enquanto um TRL mais baixo significa que a tecnologia está mais distante de poder ser utilizada (ANDERSEN, 2019).

Conjuntamente o TRL, Mankins (1995) traz o conceito de *Manufacturing Readiness Levels* (MRL), onde ela é usualmente empregada para designar e avaliar os níveis de maturidade de um processo.

Segundo a *European Association of Research and Technology Organisations* - EARTO (EARTO, 2014) a transição entre os níveis, ou seja, a fronteira entre eles, muitas vezes não está bem definida e pode variar, principalmente, em setores onde as etapas de certificação de produto e seu desenvolvimento não estão ainda bem definidas. Existe a possibilidade de recuo nos níveis, pois eventualmente mesmo os mais altos podem requerer pesquisa adicional (EARTO, 2014).

De acordo com Nolte (2011), pesquisador da *Air Force Research Laboratory* – AFRL, inúmeras revisões e modificações já foram realizadas no TRL, difundindo-se para 12 diferentes setores e gerando 58 níveis de prontidão (*Readiness Levels*), dos quais 20 estão relacionados à maturidade tecnológica. Os setores listados por Nolte (2011) são os de Sistemas Biomédicos; Sistemas sobre Sistemas; Tecnologias de Modelamento e Simulação; Sistemas de Aprendizagem; Tecnologias Automatizadas para Manufatura; Cuidados de Saúde; Tecnologias Baseadas na Prática; Famílias de Sistemas; Sistemas Intensivos de Software; Processos Químicos; Tecnologias de Combustíveis Alternativos / Certificação; Tecnologias de Plataforma onde o Departamento de Defesa dos EUA (DoD) adotou as escalas TRL em 2010.

No mesmo ano a *European Space Agency* (ESA) adotou as escalas de prontidão tecnológica onde o TRL foi referenciado pela *European Commission* (EC) para que fosse adotado nos projetos de PD&I (EARTO, 2014).

No ano de 2013 foi criada a norma de certificação da metodologia para o setor espacial denominada *Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment* - ISO 16290 (ISO, 2013). A própria Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT adotou a norma americana, traduzindo seu conteúdo, e disponibilizando então a Norma ABNT NBR ISO 16290 (ABNT, 2015), Sistemas espaciais - definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação.

Visando trazer luz às definições abordadas pela Norma ABNT NBR ISO 16290 (ABNT, 2015), o Quadro 2 apresenta as definições e fundamentos para cada um dos nove níveis de prontidão tecnológica do TRL.

Quadro 2. Definições TRL na Norma ABNT NBR ISO 16290

TRL	Definições TRL da ABNT NBR ISO 16290:2015
1	Existe pesquisa científica relacionada à tecnologia a ser avaliada e começa a ser convertida em pesquisa aplicada e desenvolvimento. Princípios de base estão observados e relatados por meio de pesquisas do tipo acadêmicas. Potenciais aplicações estão identificadas, mas requisitos de desempenho ainda não estão especificados. Em TRL 1 nenhuma missão específica pode ser associada à tecnologia, pois os conceitos e/ou aplicações só são formulados em TRL 2. Portanto, os requisitos de desempenho podem não estar definidos neste estágio.
2	Uma vez que os princípios de base foram observados, aplicações práticas podem ser inventadas. As aplicações são especulativas e pode não haver prova ou análise detalhada para dar suporte às suposições. Em TRL 2, os requisitos de desempenho do elemento são gerais e definidos de maneira abrangente, porém consistentes com qualquer conceito ou aplicação formulados.
3	A prova da função ou da característica do elemento é feita por análise, incluindo modelamento e simulação, e por experimentação. A prova deve incluir tanto estudos analíticos, para colocar a tecnologia em um contexto apropriado, quanto experimentos laboratoriais ou medidas para dar suporte físico às predições analíticas e modelos. Em TRL 3 os requisitos de desempenho do elemento são gerais, definidos de maneira abrangente e podem ser preliminares. Eles são consistentes com qualquer conceito ou aplicação formulada. Os requisitos de desempenho funcional do elemento estão estabelecidos e os objetivos estão definidos em relação ao atual estado da arte.
4	Uma maquete de laboratório do elemento é integrada para estabelecer que as peças funcionam bem juntas na demonstração do desempenho funcional básico do elemento. A verificação é de “baixa fidelidade”, comparada com o sistema final, e está limitada ao ambiente de laboratório. Em TRL 4, da mesma forma que em TRL 3, os requisitos de desempenho do elemento são gerais e definidos de maneira abrangente. Eles são consistentes com quaisquer potenciais aplicações em sistemas. Os requisitos de desempenho funcionais do elemento são estabelecidos e os objetivos estão definidos em relação ao atual estado da arte.
5	O TRL 5 é atingido quando as funções críticas do elemento são demonstradas em ambiente relevante, usando maquetes apropriadas, as quais geralmente não têm escala real nem todas as funções. O desempenho no ensaio está de acordo com as predições analíticas. Requisitos em falta ou incompletos são aceitáveis neste estágio na medida em que isto não afeta a identificação das funções críticas do elemento e o plano de verificação associado. Para atingir o TRL 5 as funções críticas do elemento são identificadas, requerendo verificação específica, e o ambiente relevante correspondente é definido. Quando o TRL 5 é atingido, a exequibilidade do elemento pode ser considerada como demonstrada, embora sujeita a problemas de escala, já que o desempenho das funções críticas está verificado por meio de ensaios com maquete no ambiente relevante. Neste estágio, os requisitos de desempenho do elemento são frequentemente consolidados, a partir dos ensaios de verificação com maquetes. No entanto, o desenvolvimento do elemento não está totalmente garantido, devido às incertezas resultantes dos efeitos em escala. Há também riscos remanescentes associados com uma falha na identificação das funções críticas, uma falta de integridade no plano de verificação associado e/ou uma subestimativa dos efeitos de acoplamento entre as peças do elemento que tornam o(s) modelo(s) inapropriado(s) para remover incógnitas.
6	O TRL 6 é atingido quando as funções críticas do elemento são verificadas no ambiente relevante. Para este propósito, um modelo representativo em termos de formato, configuração e função é usado para demonstrar as funções críticas e demonstrar, sem ambiguidade, o desempenho do elemento. O desempenho do ensaio está conforme as previsões analíticas. Em TRL 6, assim como para TRLs mais altos, os objetivos da missão, o ambiente operacional e os requisitos de desempenho operacional são estabelecidos e acordados pelas partes interessadas, levando em conta a integração do elemento no sistema final. O desempenho geral do elemento está, a princípio, demonstrado. Em particular, convém que seja possível neste estágio estabelecer um cronograma de desenvolvimento do elemento. Ainda há riscos de desenvolvimento remanescentes em relação ao desempenho que podem incluir: falha na identificação das funções críticas, falha de integralidade no plano de verificação associado, e/ou uma subestimativa dos efeitos de acoplamento entre as peças do elemento, o que torna o modelo inapropriado para remover as incógnitas.
7	O TRL 7 requer a validação do desempenho do elemento por meio de ensaios para demonstrar desempenho no ambiente operacional. Em TRL 7 os objetivos da missão, ambiente operacional e requisitos de desempenho operacional são estabelecidos e acordados com as partes interessadas, levando em conta a integração do elemento no sistema final. Para alcançar o TRL7 um modelo representativo, refletindo plenamente todos os aspectos de projeto do modelo de voo opera em um ambiente que replica todas as condições necessárias do ambiente operacional real para demonstrar que ele funciona no ambiente operacional real. Quando a demonstração do modelo é alcançada no solo, o modelo do elemento é submetido a uma série de ensaios, que são concebidos para representar o ambiente

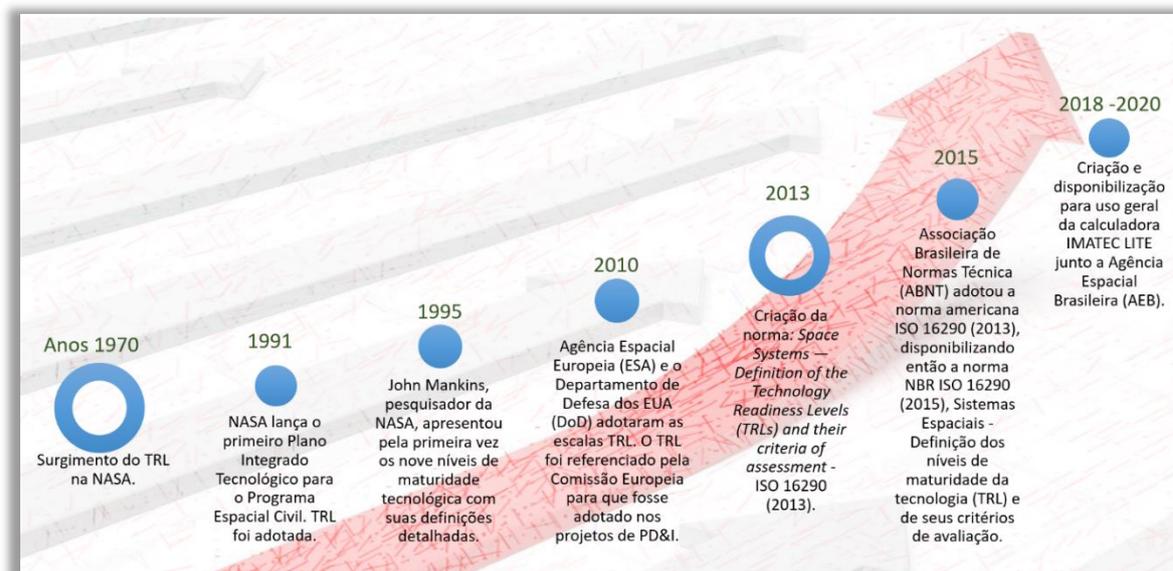
TRL	Definições TRL da ABNT NBR ISO 16290:2015
	operacional esperado com margens adequadas. Portanto, o modelo não tem a intenção de ser usado para voo, já que ele é, em geral, testado em excesso. No entanto, em alguns casos, os processos e margens de ensaio estão adaptados para o modelo a ser colocado em voo. Quando o ambiente operacional é mandatório para a demonstração do desempenho, o modelo é a primeira representação do elemento que vai voar.
8	O elemento qualificado é integrado no sistema final pronto para voar. Em TRL 8 os objetivos da missão, o ambiente operacional e os requisitos de desempenho são estabelecidos e acordados com as partes interessadas, levando em conta a integração do elemento no sistema final. Para alcançar o TRL 8 o sistema, incluindo o elemento em consideração, tem sido aceito para voo. Por definição todas as tecnologias utilizadas no sistema real estão em TRL 8.
9	O elemento qualificado é integrado no sistema final e em serviço para a missão designada. Em TRL 9 os objetivos da missão, o ambiente operacional e os requisitos de desempenho são estabelecidos e acordados com as partes interessadas, levando em consideração a integração do elemento no sistema final. O TRL 9 é alcançado e o elemento é maduro após operações bem-sucedidas e alcance de desempenho no ambiente operacional real.

Fonte: ABNT (2015)

Entre 2018 e 2020 Xavier Junior *et al.* (2020) criaram a *AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity: IMATEC*. Essa calculadora foi feita em parceria com a Agência Espacial Brasileira (AEB) tendo como base a Norma NBR ISO 16290 (ABNT, 2015).

Visando apresentar um breve histórico sobre o TRL, a Figura 1 foi elaborada.

Figura 1 - Breve Histórico sobre o TRL



Fonte: Próprio Autor

Diversas aplicações do TRL vêm sendo discutidas em diferentes áreas. O próximo tópico apresenta contextos de utilização da metodologia.

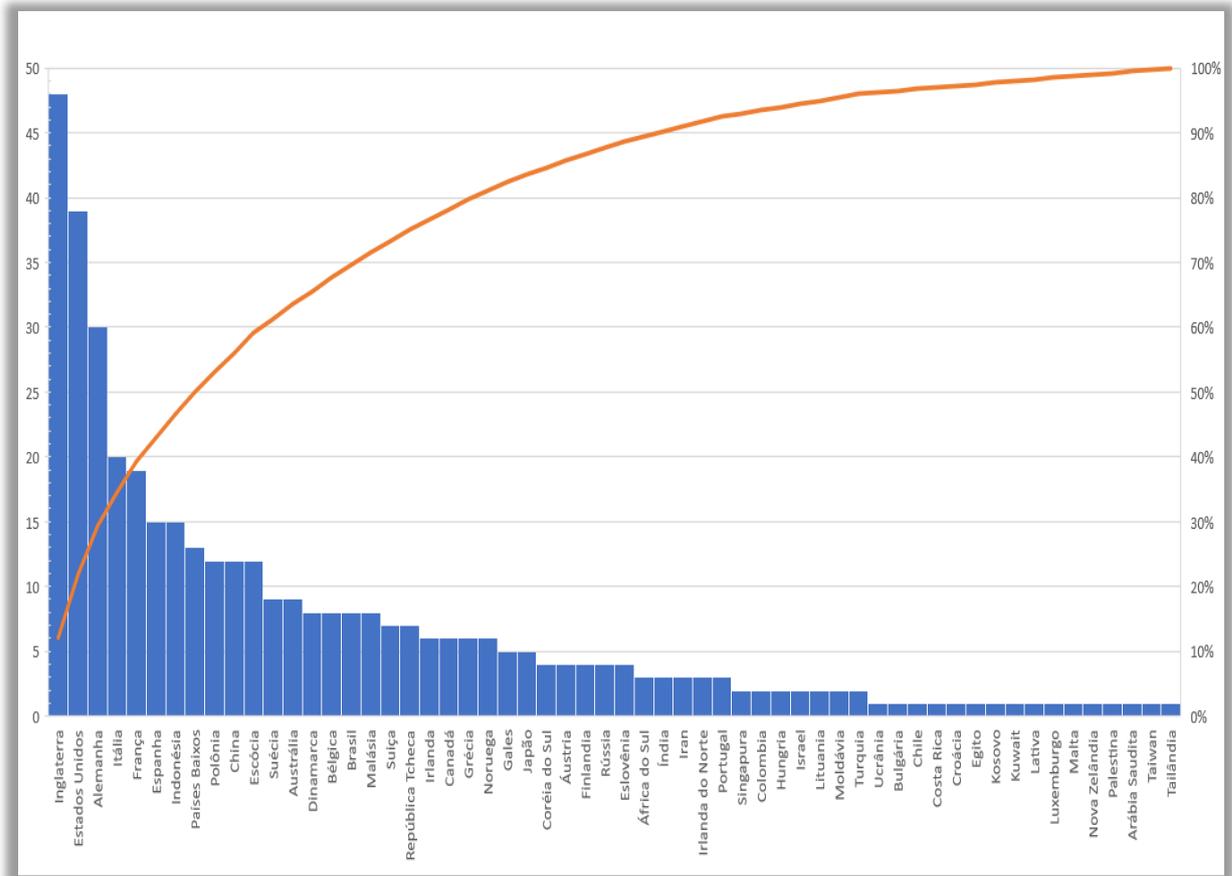
2.2 Contextualização da aplicação do TRL

Buscando contextualizar a utilização do TRL por meio de um marco teórico, uma revisão sistemática da literatura foi elaborada de tal forma a se compreender o uso da metodologia e suas ferramentas aplicadas à análise do nível de maturidade tecnológica de projetos a qual se deu por meio da definição da problemática, fundamentação teórica, levantamento dos estudos, análises e sínteses, seguindo as etapas elencadas por Garza-Reyes (2015).

As revisões sistemáticas são consideradas estudos secundários, que têm nos estudos primários sua fonte de dados. Entende-se por estudos primários os artigos científicos que relatam os resultados de pesquisa em primeira mão (GALVÃO; PEREIRA, 2014). Fez-se também uma análise bibliométrica e sistemática, que possibilitou mensurar os índices de produção e disseminação do conhecimento acerca da *Technology Readiness Levels*, de modo a acompanhar o desenvolvimento das pesquisas científicas e os padrões de autoria e publicação (VANTI, 2002; LOPES *et al.*, 2012). Para tanto, foram utilizadas as bases de conhecimento *Web of Science (WoS)* e *Scientific Periodicals Electronic Library (SPELL)*, com o intuito de se efetuar o levantamento dos dados. Outras bases como a Scopus também foram consultadas, mas como existia grande similaridade entre os trabalhos listados, a WoS foi adotada tendo como complemento a base SPELL por ser predominantemente brasileira. Os descritores usados para a seleção dos estudos foram “*Technology Readiness Levels*” e “TRL”. O intervalo de pesquisa das publicações foi limitado aos anos de 2011 até 2020, de forma a evidenciar a atualidade das pesquisas, nos idiomas português e inglês. Destaca-se que na base WoS foram encontrados 290 estudos com acesso aberto, enquanto na SPELL, três estudos estavam disponíveis para download, totalizando então 293 artigos para análise.

Ao empreender a pesquisa sobre o TRL e centrar esforços na análise da produção científica envolvendo essa temática, compreendeu-se que essa discussão tem grande potencial de exploração e que parte significativa dos estudos teóricos advém da literatura internacional e que no Brasil as pesquisas ainda são incipientes e carecem de análises mais profícuas e aprofundadas. Com o intuito de compreender quais os países que mais publicam na temática TRL, e considerando-se as publicações entre os anos de 2011 e 2020, as Figuras 2 e 3 foram elaboradas. A Figura 2 apresenta a quantidade de publicações na literatura internacional e nacional, conforme pesquisado nas bases do conhecimento que compõem este estudo, enumerando os países mais interessados. Já a Figura 3 ilustra as publicações referentes ao tema ano a ano.

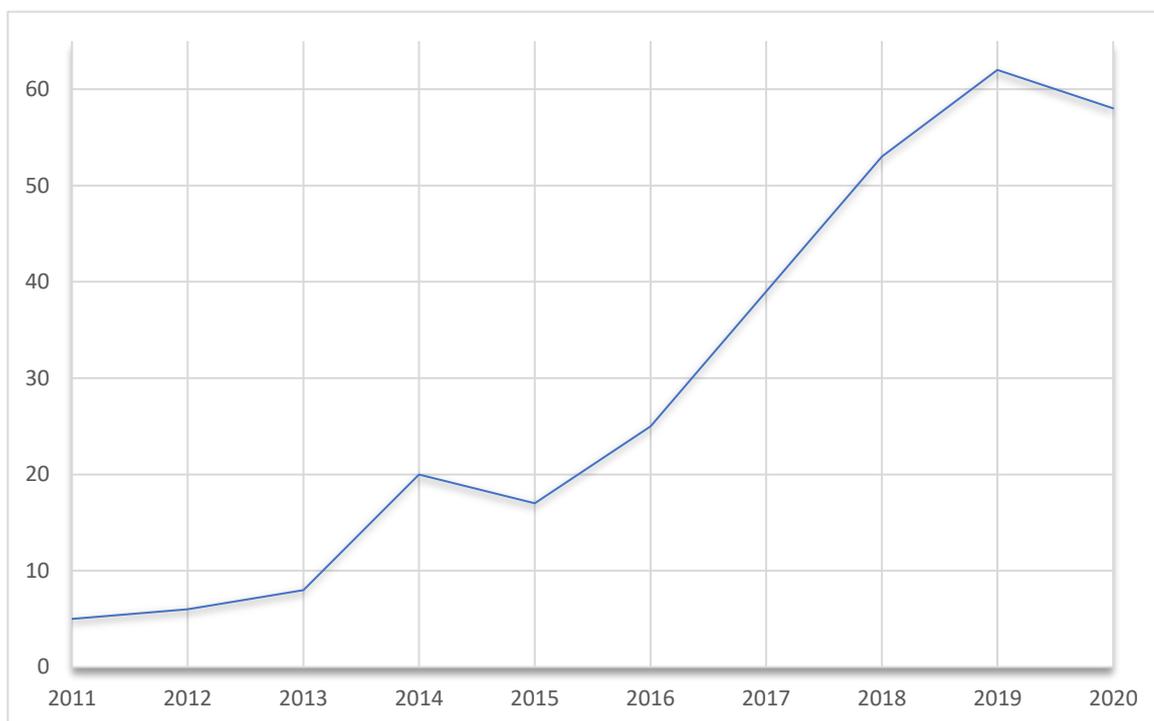
Figura 2 - Países mais interessados no assunto e número de publicações entre 2011 e 2020



Fonte: WoS e Spell

Ao se analisar os dados presentes na Figura 2, é possível verificar que os cinco países com maior número de publicações sobre o TRL são Inglaterra (48), Estados Unidos (38), Alemanha (30), Itália (20) e França (18). O Brasil possui apenas oito publicações catalogadas nas bases pesquisadas, indicando o potencial de exploração dessa temática na realidade dos estudos brasileiros.

Figura 3 - Quantidade de publicações entre 2011 e 2020

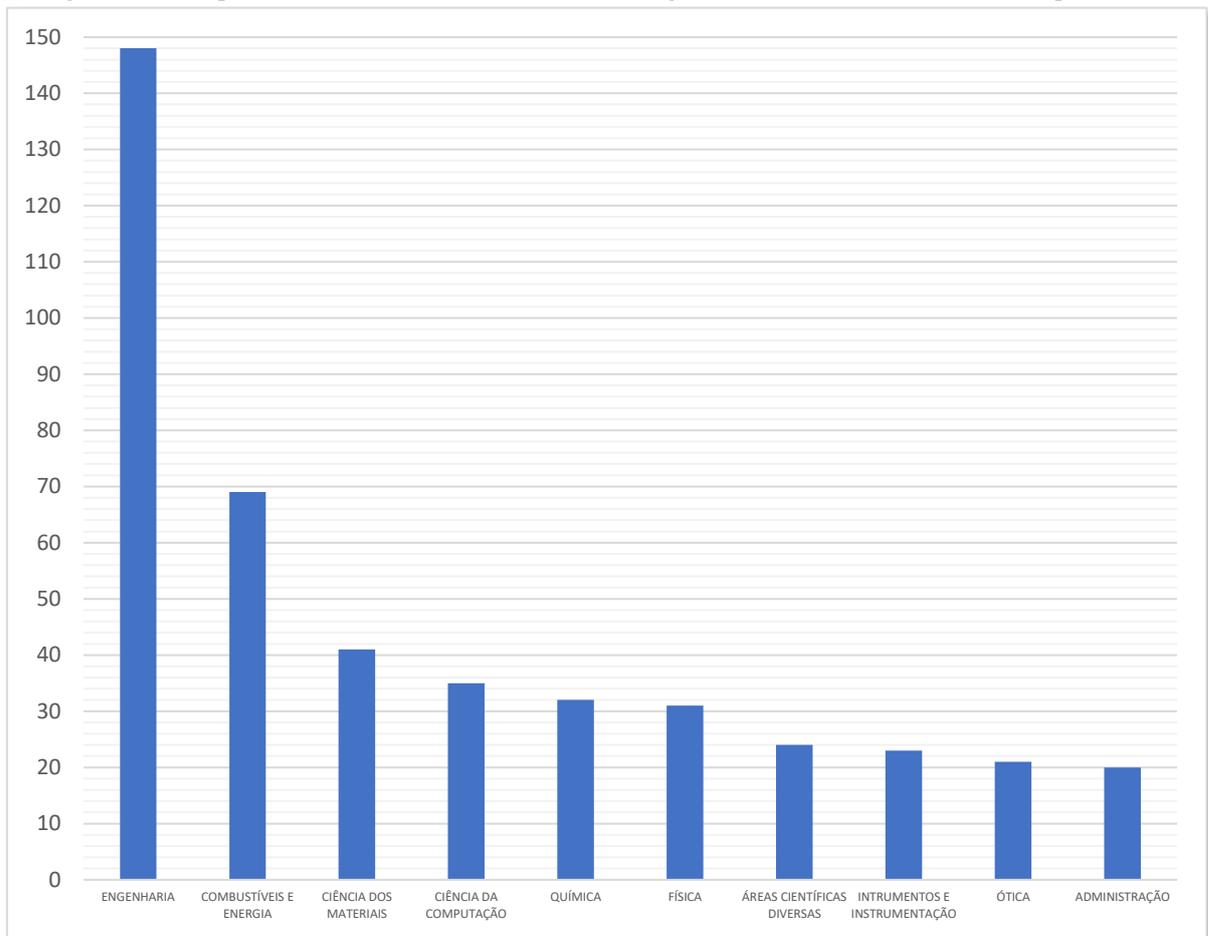


Fonte: Próprio Autor

Em relação à Figura 3, é possível perceber uma tendência de alta no que tange ao interesse sobre o tema, evidenciando a sua importância. Durante o período analisado, somente no ano de 2015 e em 2020 houve queda no número de publicações referentes ao ano anterior. O gráfico aponta a ascendência dos estudos, ratificando a importância das pesquisas e das análises envolvendo essa metodologia, o que sugere um crescimento acelerado no interesse sobre o tema. Entretanto, ainda existe um aspecto vanguardista nas pesquisas, pois quantitativamente seu número ainda pode ser considerado bastante limitado, principalmente em relação ao nível da produção científica nacional.

De acordo com Nolte (2011), diversas alterações já foram realizadas no TRL, onde ela se difundiu de sua concepção original da área aeroespacial para outros 12 diferentes setores. Ainda que tenham sido geradas extensões do conhecimento em TRL, as produções decorrentes em escala mundial parecem não acompanhar a imensidão de possibilidades de exploração desse construto teórico. Visando verificar as 10 principais áreas do conhecimento, bem como quantificar o número de trabalhos no qual as pesquisas sobre o TRL vêm sendo conduzidas, a Figura 4 foi elaborada.

Figura 4 - Principais áreas do conhecimento dos estudos ligados a TRL e número de trabalhos publicados

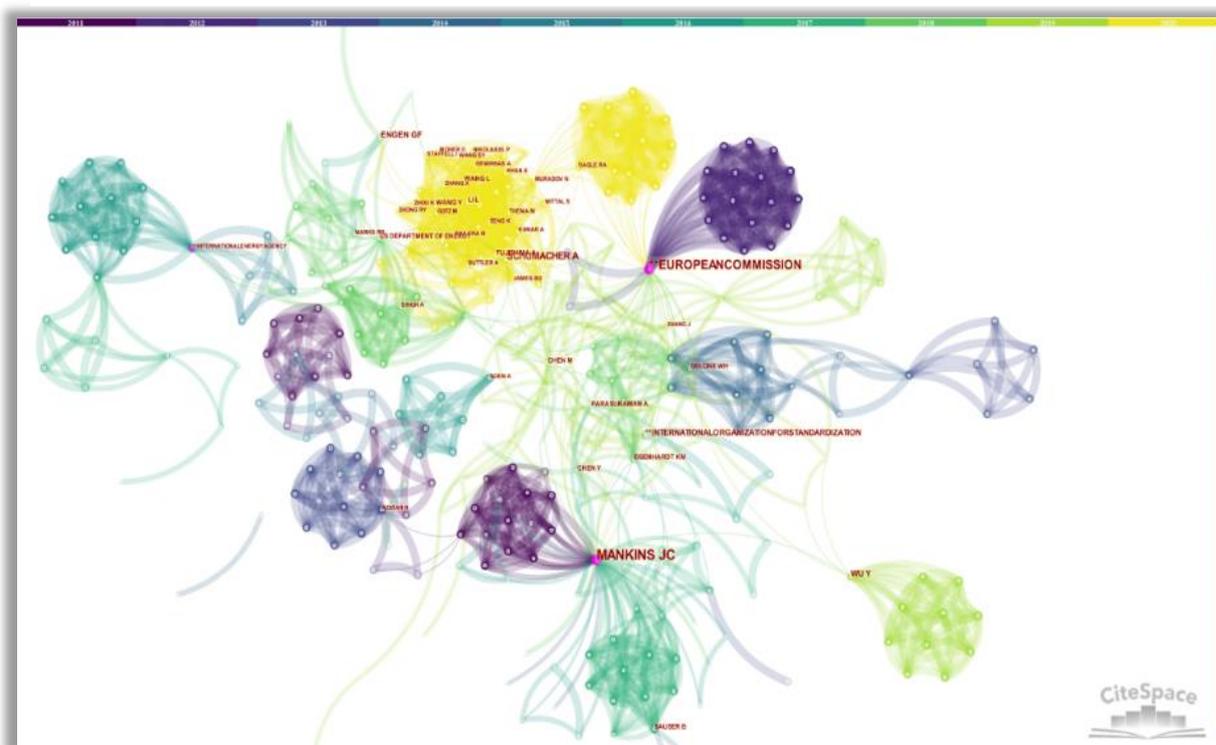


Fonte: Próprio Autor

Em consonância com as alegações já tecidas, percebe-se que a macroárea de Engenharia condensa parte significativa dos estudos e pesquisas envolvendo o TRL e que outras áreas, como a própria Administração, poderiam estar se apropriando mais intensamente dessa perspectiva teórica, especialmente nos estudos atinentes a tecnologias, estratégias, inovações e modelos de negócio tecnologicamente inovativos.

Para compreender quais os principais autores citados, dentre os trabalhos que fazem parte do universo do estudo contemplado por esta pesquisa, uma análise foi efetuada de tal forma a se estabelecer a inter-relação entre os principais autores citados e os trabalhos gerados a partir deles. A nuvem de pontos, e seu relacionamento temporal, é apresentada na Figura 5, em que autores citados ao menos três vezes tiveram sua referência explicitada.

Figura 5 - Principais Autores Citados



Fonte: Próprio Autor

Dois autores se destacam no que diz respeito a número de citações. No caso de Mankins, o autor foi um dos propulsores da metodologia. Logo, trabalhos que apresentam a contextualização de uso do TRL têm grande tendência em citá-lo. Já a *European Commission* é outro autor citado com destaque. Ela é a instituição politicamente independente que representa e defende os interesses da União Europeia na sua globalidade, propondo legislação, política e programas de ação e sendo responsável por aplicar as decisões do Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2021). O Quadro 3 foi elaborado com o intuito de apresentar os principais autores citados e sua centralidade no que diz respeito ao inter-relacionamento com as obras.

Quadro 3. Principais autores citados

Autor Citado	Citações	Centralidade	Primeira data de citação
MANKINS JC	22	0.31	2011
EUROPEAN COMMISSION	15	0.29	2012
SCHUMACHER A	7	0.02	2018
ENGEN GF	6	0.01	2017
WU Y	5	0.10	2018
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION	5	0.02	2016

Percebe-se que os artigos que tiveram em suas palavras-chave os termos “*design*” ou “*technology*” ou “*performance*” ou “*management*” ou “*framework*”, termos identificados qualitativamente como tendo relação direta com o objetivo da pesquisa, obteve-se como resultado 10 trabalhos. A seleção se justifica por tratarem de ferramentas para análise, um dos eixos que compõem a aplicação do nível de prontidão tecnológica ou do estudo do desenvolvimento de novas tecnologias tendo como base o TRL, de forma a se buscar as respostas para as questões de pesquisa estabelecidas. O Quadro 4 apresenta os artigos selecionados.

Quadro 4. Artigos com relação direta às questões de pesquisa estabelecida

Artigos Selecionados	
1	XAVIER JUNIOR, Ademir et al. AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity: Imatec. Journal of Aerospace Technology And Management , [S.L.], v. 1, n. 12, p. 1-17, 4 abr. 2020.
2	SUZIANTI, Amalia et al. Technology readiness level assessment of lithium battery in Indonesia for national electric vehicle program. Recent Progress On: MECHANICAL, INFRASTRUCTURE AND INDUSTRIAL ENGINEERING , [S.L.], v. 3, n. 5, p. 1-9, 2020.
3	PETROVIC, Slobodan; HOSSAIN, Eklas. Development of a Novel Technological Readiness Assessment Tool for Fuel Cell Technology. Ieee Access , [S.L.], v. 8, p. 132237-132252, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
4	PETRESCU, Tudor-Cristian <i>et al.</i> Developing a TRL-oriented roadmap for the adoption of biocomposite materials in the construction industry. Frontiers of Engineering Management , [S.L.], v. 5, n. 1, p. 1-14, 13 mar. 2021.
5	FICO, Vito Mario <i>et al.</i> High Technology Readiness Level Techniques for Brushless Direct Current Motors Failures Detection: a systematic review. Energies , [S.L.], v. 13, n. 7, p. 1573, 1 abr. 2020.
6	RIORDAN, James <i>et al.</i> Interdisciplinary Methodology to Extend Technology Readiness Levels in SONAR Simulation from Laboratory Validation to Hydrography Demonstrator. Journal of Marine Science and Engineering , [S.L.], v. 7, n. 5, p. 159, 23 mai. 2019.
7	LAVOIE, Joao Ricardo; DAIM, Tugrul Unsal. Technology Readiness Levels Improving R&D Management: a grounded theory analysis. Proceedings of PICMET '17: Technology Management For Interconnected World Technology , Portland, v. 5, n. 1, p. 1-9, out. 2017.
8	CAMARK, Will <i>et al.</i> Technology readiness levels for advanced nuclear fuels and materials development. Nuclear Engineering and Design , [s. l.], v. 313, n. 3, p. 177-184, maio 2017.
9	EL-KHOURY, Bernard; KENLEY, C. Robert. An Assumptions-Based Framework for TRL-Based Cost and Schedule Models. Journal Of Cost Analysis And Parametrics , [S.L.], v. 7, n. 3, p. 160-179, 2 set. 2014.
10	TAN, Weiping <i>et al.</i> A probabilistic approach to system maturity assessment. Systems Engineering , [S.L.], v. 14, n. 3, p. 279-293, 7 out. 2010.

Fonte: Próprio Autor

Cumprir aludir que a fundamentação teórica que trata das bases do TRL é bastante similar em todas as obras, mas sua aplicação e contextualização divergem completamente de publicação para publicação. Tem-se que Camark *et al.* (2017), Fico *et al.* (2020) e Suzianti *et al.* (2020) adotaram uma abordagem teórica de aplicação do TRL para atingir os objetivos de análise do nível de maturidade propostos para cada um dos estudos. Petrovic e Hossain (2020) também fizeram uso de uma abordagem teórica para análise do nível de maturidade, mas seu estudo foi baseado em um modelo de análise de maturidade especificamente desenvolvido pelos

autores, tendo como alicerce teórico o TRL. Petrescu *et al.* (2020) seguiram a mesma abordagem, mas em sua obra construíram uma ferramenta de *roadmap* para corroborar os resultados da pesquisa apresentados.

Em relação ao processo metodológico utilizado, os autores Tan *et al.* (2010), Camark *et al.* (2017), Fico *et al.* (2020), Suzianti *et al.* (2020), Xavier Junior *et al.* (2020) e Petrescu *et al.* (2020), abordaram em suas obras, ainda que não exclusivamente, um estudo de caso. Dentre as obras pesquisadas, alguns autores tiveram o objeto de estudo diretamente ligado ao desenvolvimento de produtos ou tecnologias que compõem produtos inovadores. Camark *et al.* (2017) adotaram uma abordagem da aplicação do TRL para o desenvolvimento de materiais e combustíveis nucleares avançados. Já Fico *et al.* (2020) apresentaram a aplicação da metodologia para a análise de falhas durante o desenvolvimento de motores de corrente contínua sem escova (*bushless*). Suzianti *et al.* (2020) trataram do desenvolvimento da tecnologia de baterias de lítio para aplicações em carros elétricos, enquanto Petrescu *et al.* (2020) utilizaram o TRL para avaliar o desenvolvimento de materiais biocompósitos sustentáveis, de baixo impacto ambiental e com aplicação direta na indústria da construção civil. Curiosa a constatação de que outros autores, que também trabalharam com estudos de casos, criaram suas próprias ferramentas para a avaliação do nível de maturidade tecnológica, baseados no TRL.

Em relação à sistematização dos resultados, cada uma das obras apresenta, em linhas gerais, um alinhamento específico ao objeto do estudo proposto. Tan *et al.* (2010) elaboraram um modelo probabilístico baseado em funções de densidade de probabilidade para validar os níveis de prontidão tecnológica (TRL) e os Níveis de Prontidão de Sistema (SRL) – modelo no qual o caso estudado vem de um exemplo ilustrativo para utilização no processo de reparação do telescópio espacial Hubble, da NASA.

Tan *et al.* (2010) abordam que sua adaptação da metodologia pode ser utilizada como referência para a tomada de decisões, considerando que as métricas podem ser uma parte integrante das atividades de gestão para indicar desempenho ou eficácia de risco, qualidade e maturidade, bem como identificar parâmetros críticos, estabelecendo marcos para avaliar o progresso e fornecer orientação para gestão de risco/mitigação. Segundo os mesmos autores, existe a necessidade de se diminuir o impacto subjetivo humano na estimativa dos níveis de prontidão.

Já Xavier Junior *et al.* (2020) criaram a “*AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity (IMATEC)*”. Essa calculadora foi feita em parceria com a Agência Espacial Brasileira (AEB) e se mostra adequada para a utilização em qualquer projeto de

pesquisa e desenvolvimento de produtos ligados ao desenvolvimento tecnológico e inovação, de modo que sua validação foi feita em um projeto de nano satélite. Os pesquisadores Lavoie e Daim (2017) realizaram um estudo no qual buscaram classificar a importância da metodologia TRL por meio de uma pesquisa tipo *survey*. Foi solicitado aos entrevistados que classificassem o nível de importância dos TRLs para as atividades de P&D. Os respondentes da pesquisa, em sua maioria, consideraram como "muito importante".

El-Khoury e Kenley (2014) apresentaram a criação de um modelo preditivo probabilístico para estimar custos e prazos de um projeto baseado no TRL, onde os resultados das análises feitas pelos pesquisadores influenciavam diretamente no objeto da pesquisa. O método teoricamente gera uma distribuição conjunta de custo e cronograma que responde pelo processo de decisão do gerente de portfólio. Entretanto, mais dados são necessários para testar e avaliar o poder preditivo do modelo (EL-KHOURY; KENLEY, 2014).

Riordan *et al.* (2019) fizeram uma abordagem de aplicação do TRL em uma validação laboratorial do projeto de um SONAR hidrográfico, onde a gestão desse projeto e as ações tomadas foram readequadas com base nos resultados obtidos pela mensuração do TRL da etapa do desenvolvimento do projeto em questão. O desenvolvimento foi conduzido em três fases mapeadas para marcos de avanço na escala TRL 3 até TRL 7. A mesma metodologia foi adotada por Petrovic e Hossain (2020), ainda que os autores tenham desenvolvido sua própria ferramenta para a avaliação do nível de maturidade, para utilização específica em tecnologia de células de combustível.

Abordagem similar é feita também por Fico *et al.* (2020), Xavier Junior *et al.* (2020) e Suzianti *et al.* (2020), em que cada um dos trabalhos analisa a aplicação em projetos e desenvolvimento de tecnologias específicas.

Visando sintetizar os resultados, ferramentas e análises foi elaborado o Quadro 5.

Quadro 5. Síntese dos resultados, ferramentas ou análises utilizadas

	Autores	Síntese dos Resultados	Ferramentas ou análises utilizadas	TRLs analisados
1	Suzianti <i>et al.</i> (2020)	Concluiu-se que o nível de prontidão da tecnologia da bateria de lítio na Indonésia atingiu o TRL 5, onde os componentes tecnológicos foram validados no ambiente de pesquisa e desenvolvimento.	Análise teórica	1 a 5
2	Xavier Junior <i>et al.</i> (2020)	Desenvolvimento de uma calculadora <i>online</i> de TRL pela AEB- Agência Espacial Brasileira.	Utilização da AEB <i>Online Calculator for Assessing Technology Maturity</i> : IMATEC	1 a 9

	Autores	Síntese dos Resultados	Ferramentas ou análises utilizadas	TRLs analisados
3	Petrovic e Hossain (2020)	Justificou que a ferramenta <i>Fuel Cell Technology Readiness Level</i> (FCTRL) é mais adequada para avaliar a tecnologia de células de combustível, sendo sua utilização adequada para essa aplicação específica.	Análise teórica através da escala criada, denominada “ <i>fuel cell readiness levels</i> ”	N/A
4	Petrescu <i>et al.</i> (2020)	Trouxe que o <i>Roadmap</i> criado baseado na metodologia <i>Technology Readiness Levels</i> é uma ferramenta relevante para o desenvolvimento de um produto, no caso validado pelo produto “ <i>liquid wood</i> ”.	Análise da utilização de um <i>Roadmap -TRL</i> para desenvolvimento de produto	4 a 9
5	Fico <i>et al.</i> (2020)	Apresentou uma revisão sistemática de técnicas mensuradas pelo TRL para detecção de falhas em motores BLDC que foram publicadas no período do início de 1990 a novembro de 2019.	Análise teórica	N/A
6	Riordan <i>et al.</i> (2019)	Apresentou o desenvolvimento de um SONAR subaquático em escala de pesquisa e simulação, demonstrando seu uso em um ambiente de treinamento de hidrografia do mundo real. O desenvolvimento foi conduzido em três fases mapeadas para marcos de avanço na escala TRL 3 até TRL 7.	Análise teórica e simulação computacional	3 a 7
7	Lavoie e Daim (2017)	Identificou-se os benefícios que as pessoas percebem ao usar os TRLs e a relação potencial que esses benefícios podem ter com os problemas de P&D que as organizações enfrentam, bem como a maneira como os TRLs podem ajudar a resolver esses problemas.	<i>Survey</i>	N/A
8	Camark <i>et al.</i> (2017)	O conceito TRL é usado como uma ferramenta de gerenciamento e comunicação do programa de pesquisa e desenvolvimento e não é uma medida quantitativa absoluta de maturidade.	Análise teórica	4 a 9
9	El-Khoury e Kenley (2014)	O método teoricamente gera uma distribuição conjunta de custo e cronograma que responde pelo processo de decisão do gerente de portfólio, mas mais dados são necessários para testar e avaliar o poder preditivo do modelo.	Modelo criado, testado e validado por meio do software Microsoft Excel	1 a 9
10	Tan <i>et al.</i> (2010)	A adaptação da metodologia apresentada aparenta estar na direção que visa diminuir o impacto da subjetividade na estimativa dos níveis de prontidão tecnológica e de sistema, mas existem limitações que devem ser tratadas em trabalhos futuros como a análise da efetividade do modelo proposto, a suposição que cada estimador fornece apenas um número único para sua estimativa sobre uma tecnologia e o número iterações para análise de Monte-Carlo de modo que o modelo se torne consistente.	Simulação computacional baseada em análise de Monte-Carlo	N/A

Fonte: Próprio Autor

Como visualizado, dentre os autores, somente Xavier Junior *et al.* (2020) criaram uma ferramenta de uso amplo e irrestrito, capaz de avaliar os níveis de prontidão tecnológica baseado

nos níveis originais propostos por Mankins (1995) em qualquer projeto de pesquisa e desenvolvimento. Com relação ao uso do TRL em empresas de base tecnológica, El-Khoury e Kenley (2014) afirmam que o TRL pode ser adotado como uma referência padrão de mensuração do risco tecnológico, sendo empregada para avaliar a maturidade tecnológica de um determinado projeto de P&D a ser executado.

Para Ribeiro (2019), a utilização dessa metodologia faz todo sentido dentro de uma empresa de base tecnológica. Para Lavoie e Daim (2017), o TRL é uma métrica de avaliação de tecnologia precisa, possibilitando uma melhor tomada de decisão, pois se trata de uma estrutura simples e uma ferramenta de gestão eficaz. Sua implantação melhora na organização as habilidades de comunicação, auxiliando também no equilíbrio entre portfólio de tecnologia e projetos.

Entretanto, Tan *et al.* (2010) discordam da visão de Lavoie e Daim (2017) em relação o TRL ser uma métrica de avaliação de tecnologia precisa pois, na visão destes últimos, existe a subjetividade da análise humana na avaliação dos níveis de prontidão tecnológicos. De toda forma, Tan *et al.* (2010) corroboram a importância do *Technology Readiness Levels*, tanto que sua adaptação probabilística se baseia nela.

Por fim, a análise feita neste capítulo das obras que tratam da produção científica mundial ligada à utilização da metodologia TRL, e que estão relacionadas ao desenvolvimento de produtos inovadores ou com tecnologias inovadoras e ferramentas, trouxe diversas implicações e possibilitou atingir ao primeiro objetivo específico estabelecido. Todas as pesquisas em questão, demonstraram que a metodologia vem sendo utilizada em projetos tecnológicos de ponta e normalmente de elevada complexidade de execução, principalmente em cenários nos quais o domínio da tecnologia necessária para sua execução ainda é incipiente.

Os trabalhos analisados demonstraram ser possível evidenciar a importância da utilização dessa metodologia para auxiliar e explicitar com eficiência o risco tecnológico presente em cada etapa do desenvolvimento de um sistema/produto tecnologicamente novo ou com a tecnologia não dominada pelo grupo envolvido no desenvolvimento. A maior parte dos projetos de P&D no universo pesquisado apresentaram ligações com o setor militar ou com projetos de importância governamental, enquanto empresas privadas de base tecnológica que utilizavam a metodologia não foram especificamente destacadas.

Também foi evidenciado o uso das ferramentas para a análise do nível de maturidade tecnológica ou do desenvolvimento de novas tecnologias que vêm sendo utilizadas em associação com o TRL ou metodologias propostas para análise do nível de maturidade que dela derivam. Os nove subníveis que compõem o TRL levam à definição de etapas que passam pela

pesquisa básica da tecnologia, desenvolvimento tecnológico e desenvolvimento de sistemas e subsistemas. O nível de maturidade mais baixo, TRL-1 denota que os princípios básicos devem ser observados e reportados e, ao se atingir o nível de maturidade tecnológica 9, ou TRL-9, todos os sistemas estão testados, aprovados e prontos para lançamento.

Em síntese, a fundamentação teórica revelou a potencialidade de aplicação e de aprofundamento técnico, teórico, metodológico e analítico que o TRL fornece para campos multivariados de estudos, com grande potencial para ser explorado em pesquisas na área de Administração, vislumbrando não somente avanços científicos, mas possibilidades promissoras de fomento à inovação tecnológica nos mais variados projetos, sistemas e modelos de negócios.

2.3 Métodos de avaliação do TRL e seus desafios

Para que o TRL possa ser aplicada em um projeto de P&D real é necessário que se compreenda a existência de uma grande diversidade de métodos para avaliação, tanto do TRL quanto do MRL, ou ainda outros níveis de prontidão tecnológica criados posteriormente ao TRL/MRL, onde cada autor traz as suas adaptações conforme a abordagem teórica de sua pesquisa.

Partindo da pesquisa de Nolte (2011), o *TRL Calculator* é uma ferramenta para aplicar TRLs a programas de desenvolvimento de tecnologia. Em sua forma atual, a calculadora é um aplicativo de planilha do *Microsoft Excel* que permite ao usuário responder a uma série de perguntas sobre um projeto de tecnologia. Assim que as perguntas forem respondidas, a calculadora exibe o TRL alcançado. Como o mesmo conjunto de perguntas é respondido a cada vez que a calculadora é usada, a ferramenta fornece um processo padronizado e repetível para avaliar a maturidade de qualquer tecnologia de *hardware* ou *software* em desenvolvimento.

A Figura 7 traz a versão 2.2 do *TRL Calculator* utilizado pelo AFRL, acessado em março de 2021 e disponível em <https://www.dau.edu/cop/stm/lists/tools/allitems.aspx>.

Figura 7 - TRL Calculator

AFRL Transition Readiness Level Calculator, version 2.2 **Summary**

Reset All

Use Manufacturing Hide Blank Rows
 No Manufacturing

Use Programmatic % Complete is now set at: 100%
 No Programmatic

Green set point is: 100% Yellow set point is: 67% Change set points on Summary sheet.

Hardware and Software Calculator

Only Hardware
 Only Software
 Hardware & Software

		Technology Readiness Level Achieved								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Technical: 9								

Do you want to assume completion of TRL 1?

H/SW	Ques	% Complete	TRL 1 (Check all that apply or use slider for % complete)
B	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> "Back of envelope" environment
B	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Physical laws and assumptions used in new technologies defined
S	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Have some concept in mind that may be realizable in software
S	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Know what software needs to do in general terms
B	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Paper studies confirm basic principles
S	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Mathematical formulations of concepts that might be realizable in software
S	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Have an idea that captures the basic principles of a possible algorithm
B	P	100	<input checked="" type="checkbox"/> Initial scientific observations reported in journals/conference proceedings/technical reports
B	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Basic scientific principles observed
B	P	100	<input checked="" type="checkbox"/> Know who cares about technology, e.g., sponsor, money source
B	T	100	<input checked="" type="checkbox"/> Research hypothesis formulated
B	P	100	<input checked="" type="checkbox"/> Know who will perform research and where it will be done

Reset Level 1

Fonte: Nolte (2011)

Rocha (2017) também desenvolveu em sua pesquisa uma calculadora para a avaliação de TRL, construída no *software Microsoft Excel*, aplicativo denominado Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1. O processo de avaliação por meio desse aplicativo ocorre em três passos, sendo eles: demonstração da metodologia de avaliação TRL, dados da tecnologia a ser avaliada e avaliação TRL. Para construção desta calculadora Rocha (2017) avaliou outras calculadoras, estudos principalmente ligados à área militar e métodos de análises preexistentes no que tange o estudo do TRL onde a norma ABNT NBR ISO 16290 (ABNT, 2015) balizou a criação da ferramenta. A Figura 8 traz uma visão parcial da calculadora TRL IAE-ITA 2016-1 desenvolvida por Rocha (2017), acessada em março de 2021, e disponível em <http://www.mec.ita.br/~cge/Acervo/CalculadoraTRLIAEITA.xlsm>.

Figura 8 - Calculadora TRL IAE-ITA 2016-1

Nível de Maturidade Tecnológica- TRL

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

Nome da: _____ Responsável pela: _____
Data da Avaliação: _____

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

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

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

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

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

Tolerância: 85%

INICIAR AVALIAÇÃO

Fonte: Rocha (2017).

A norma ABNT NBR ISO 16290 (ABNT, 2015) balizou a criação da ferramenta de Rocha (2017), pois nela toda a metodologia de aplicação está descrita.

Segundo Xavier Junior *et al.* (2020), o desenvolvimento de uma calculadora de avaliação de prontidão tecnológica envolve a criação de uma estrutura analítica do produto em termos de um determinado sistema ou missão, sendo este descrito até um nível mínimo predeterminado; o uso de consultas para que o usuário possa avaliar a maturidade tecnológica de cada elemento; a adoção de um integrador automático para resumir o TRL do produto em função da entrada; e, por fim, a saída dos dados é fornecida como um relatório final com todo o mapa do TRL vinculado ao produto.

Xavier Junior *et al.* (2020) criou então a *AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity: IMATEC*. Essa calculadora foi feita em parceria com a Agência Espacial Brasileira - (AEB) e se mostra adequada para utilização em qualquer projeto de pesquisa e desenvolvimento de produtos ligados ao desenvolvimento tecnológico e a inovação sendo possível exportar em formato *.json* os dados inseridos e os resultados da análise.

A calculadora se encontra disponível para uso no sítio eletrônico da AEB, ligado ao governo federal brasileiro. Esta ferramenta foi acessada pela primeira vez em março de 2021 e está disponível em <http://imatec.aeb.gov.br/#/main>. A Figura 9 ilustra uma das telas da calculadora IMATEC.

Figura 9 - Calculadora AEB IMATEC



Fonte: AEB (2021)

Mesmo com a existência de diversas ferramentas, existem desafios ao se tratar do TRL. Olechowski *et al.* (2015) mapeou 15 desafios encontrados para a denominada “implementação moderna” do TRL. Esses desafios foram divididos em relação à complexidade dos sistemas, ao planejamento e a revisão e da validade da avaliação.

Em relação à complexidade dos sistemas se destacam os desafios referentes a integração e conectividade, maturidade da interface, escopo da avaliação TRL, influência de novos componentes ou ambiente, priorização dos esforços de desenvolvimento de tecnologia, prontidão do sistema e, por fim, visualização, planejamento e revisão.

Já em relação ao planejamento e a revisão, os desafios estão ligados ao alinhamento do TRL com o lançamento do produto, renúncias, planos de *backup*, esforços para progredir, confiança no processo e *roadmapping* do produto.

Por fim, em relação à validade da avaliação, Olechowski *et al.* (2015) abordam as questões referentes à subjetividade da avaliação e a imprecisão da escala.

Mesmo com todos os desafios listados, os resultados e relevância do TRL já demonstrados por outros autores são incontestáveis, onde sua aplicação traz benefícios diretos na gestão do risco tecnológico inerente à inovação e criação de novos produtos.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Objeto de estudo

A pesquisa foi desenvolvida na Sense Eletrônica LTDA, uma empresa de base tecnológica da área de automação industrial e líder brasileira na área de sensores industriais. A Sense é uma das principais companhias nacionais do mercado de automação industrial, sendo exportadora de produtos tecnológicos brasileiros para mais de 30 países.

A história da empresa começou em 1976, com a parceria de dois engenheiros recém-formados no Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) dispostos a empreender em um segmento pouco explorado na época, o de equipamentos para automação industrial.

Em uma área de 5.000 m² e excelente infraestrutura, a empresa conta com moderno maquinário e utiliza diversos processos automáticos em sua linha de produção. Possuindo cerca de 250 colaboradores diretos, desenvolve cerca de cinco novos projetos por ano nas áreas de *Factory Automation*, *Process Automation* e *Service* tendo um investimento anual em P&D de cerca de R\$ 5.000.000,00. É reconhecida nacionalmente pelo desenvolvimento de produtos inovadores, sendo beneficiária tanto da Lei do Bem, quanto da Lei da Informática. O departamento de P&D utiliza as diretrizes do Guia PMBOK em seus projetos. Esse guia contempla boas práticas para a execução de projetos de acordo com o *Project Management Institute* (PMI).

Já o projeto específico, objeto do estudo, é um sensor ultrassônico industrial, cujas tecnologias construtivas são dominadas em plenitude por poucas companhias no mundo e a Sense pretende adentrar nesse mercado com sua tecnologia nacional e proprietária.

Outras justificativas para o desenvolvimento da pesquisa na empresa estão associadas ao fato de que se dispôs a fornecer os dados necessários, desde que não sejam apresentadas tecnologias ou soluções que compõem seus diferenciais competitivos e segredos industriais.

Em uma pesquisa de mercado realizada internamente pelo departamento de *marketing* da Sense Eletrônica LTDA foi constatado que todos os sensores ultrassônicos disponíveis mundialmente comungam de uma mesma carência, ou seja, a necessidade de um sistema de configuração e monitoração mais evoluído.

Assim, o objeto de estudo é um projeto tecnologicamente inovador, um Sensor Ultrassônico Industrial, produto em desenvolvimento pela empresa Sense. Trata-se de um primeiro modelo de sensor desenvolvido que consolidará a plataforma tecnológica para a construção de uma família de sensores ultrassônicos a serem criados subsequentemente. Os

poucos sensores ultrassônicos industriais disponíveis no mercado mundial e utilizados na automação de processos industriais são classificados como instrumentos de “chão de fábrica”, sendo conectados ao sistema de controle por meio de cabos de sinais, de uma forma totalmente obsoleta do ponto de vista referentes às tecnologias aplicáveis aos conceitos da indústria 4.0.

Sendo assim, o estado da técnica atual se beneficiaria de forma significativa se um sistema de configuração e monitoração via *smartphones* ou *tablets*, utilizando a tecnologia *Bluetooth*, fosse adotado no novo sensor em desenvolvimento. No caso desse projeto, a empresa não possui o completo *know-how* para o desenvolvimento de todas as tecnologias necessárias, tanto para o funcionamento básico do sensor quanto para questões evoluídas referentes à indústria 4.0.

A metodologia TRL pode contribuir para mensurar a maturidade da tecnologia pela demonstração da capacidade tecnológica. A escolha dessa metodologia para este estudo também está fundamentada em sua pertinência no que tange a critérios estabelecidos, tanto por organismos governamentais brasileiros quanto por normatizações internacionais, extrapolando assim seu uso original para o setor aeroespacial. Buscar meios de se gerir o risco e a incerteza ligados às etapas de maturidade tecnológica relacionadas ao desenvolvimento de novos produtos, principalmente quando a tecnologia para tal ainda não é dominada, parece fazer todo sentido.

3.2 A pesquisa-ação

De acordo com Gil (2019), tomando como base o método científico, a pesquisa em questão pode ser classificada como pesquisa aplicada quanto à sua natureza, pois gera conhecimentos para aplicação prática, direcionados à solução de problemas específicos.

Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa normativa e descritiva, pois visa desenvolver políticas, estratégias e ações para melhorar os resultados disponíveis em uma situação existente, implantando uma ferramenta que visa solucionar um problema definido.

Já em relação à forma de abordar o problema, a pesquisa é qualitativa por considerar que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o objeto de pesquisa, onde a interpretação dos fenômenos e a atribuição de seus significados são inerentes à pesquisa, tendo como base a metodologia estabelecida.

Com relação ao método de pesquisa, será realizada uma pesquisa-ação, tipo de pesquisa social com base empírica que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo e no qual os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (THIOLLENT, 2005). Um projeto-intervenção, fundamenta-se nos pressupostos da pesquisa-ação. Tem como base a ideia de uma relação dialética entre pesquisa e ação, supondo ainda que a pesquisa deve ter como função a transformação da realidade (MEC, 2007).

De acordo com Thiollent (2005) e Mello *et al.* (2011), o fundamento básico desse método de pesquisa consiste na intervenção, por meio do trabalho conjunto entre pesquisadores e membros da organização, para: i) definição do problema; ii) busca de soluções; e iii) aprofundamento do conhecimento científico disponível e, por isso, para os mesmos autores, esse procedimento deve agregar várias técnicas de pesquisa social, para estabelecer uma estrutura coletiva, participativa e ativa ao nível de captação de informação e solução de problemas.

Para Coughlan e Coughlan (2002), para usar a pesquisa-ação como procedimento técnico de pesquisa é necessário que se tenha um problema real de pesquisa, que seja gerencialmente relevante, que apresente um resultado incerto para a organização e que possa ser submetido a uma rigorosa investigação, contemplando a análise e implementação de ações.

A partir das condições de uso apresentadas, Coughlan e Coughlan (2002) afirmam que a implementação de uma pesquisa-ação compreende três tipos de passo: 1) um pré-passo, para entender o contexto e o propósito da pesquisa; 2) seis passos principais, compreendendo a obtenção, *feedback*, análise de dados, planejamento, implantação e avaliação de ações; e 3) um meta-passo, que corresponde ao monitoramento dos passos anteriores. Tendo como base o pré-passo 'Contexto e Propósito' os autores elencam dois questionamentos que devem ser respondidos. São eles:

1. Qual é a razão para a ação? Ou seja, é necessário saber, por exemplo, porque o projeto é necessário e quais são as forças econômicas, políticas, sociais e técnicas que levam a ação.

2. Qual é a razão para a pesquisa? Ou seja, é importante saber, por exemplo, o porquê vale a pena estudar o problema, se a pesquisa-ação realmente é uma metodologia adequada e qual a contribuição gerada para o conhecimento.

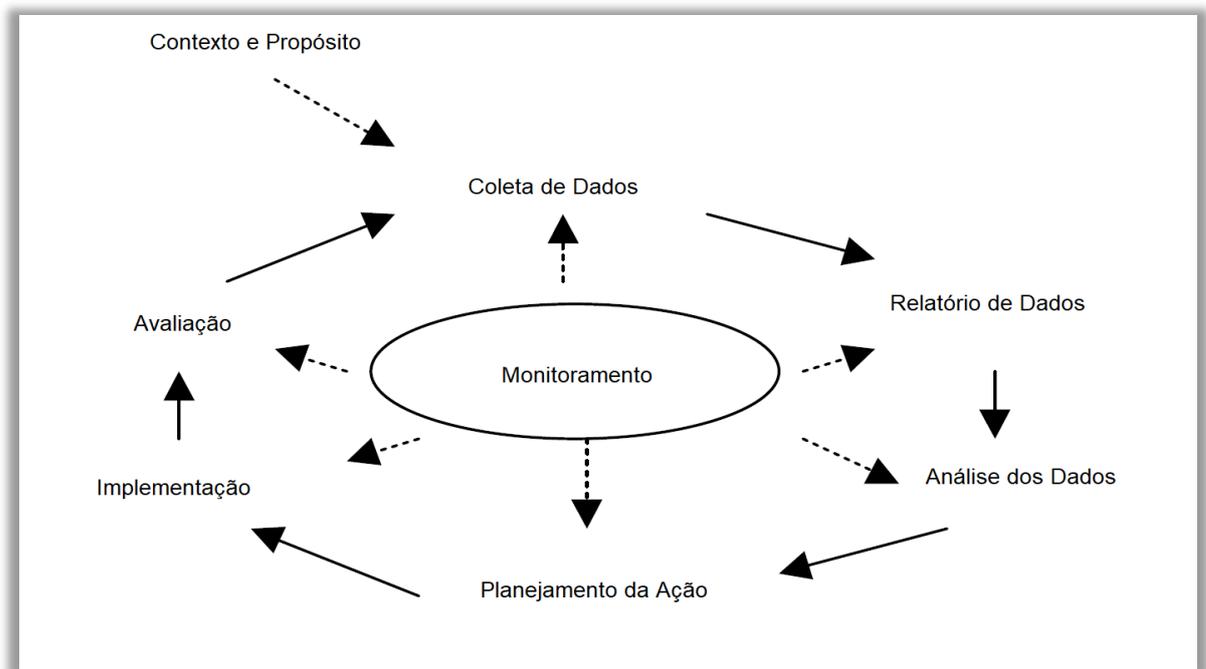
A preocupação com uma adoção mais adequada dos métodos de pesquisa, em áreas que se ocupam de problemas ligados à gestão de operações, tem motivado a produção de diversos trabalhos que se dedicam tanto a apresentar esses métodos de pesquisa quanto a propor

recomendações para a sua aplicação em diversas abordagens metodológicas de pesquisa, como a pesquisa-ação (DRESCH; LACERDA; CAUCHICK MIGUEL, 2015).

Na pesquisa-ação o projeto é estabelecido no ambiente e constantemente acompanhado e avaliado segundo o interesse de investigação. Como produto do processo, tem-se a geração de conhecimento científico. Ao mesmo tempo, desenvolve-se o ciclo da ação, cujo compromisso é resolver algum problema da realidade (MENELAU *et al.*, 2014).

Visando demonstrar os passos da implantação da pesquisa-ação, a Figura 10 foi disponibilizada.

Figura 10 - Passos para implantação da pesquisa-ação como procedimento técnico



Fonte: Adaptado Coughlan e Coughlan (2002)

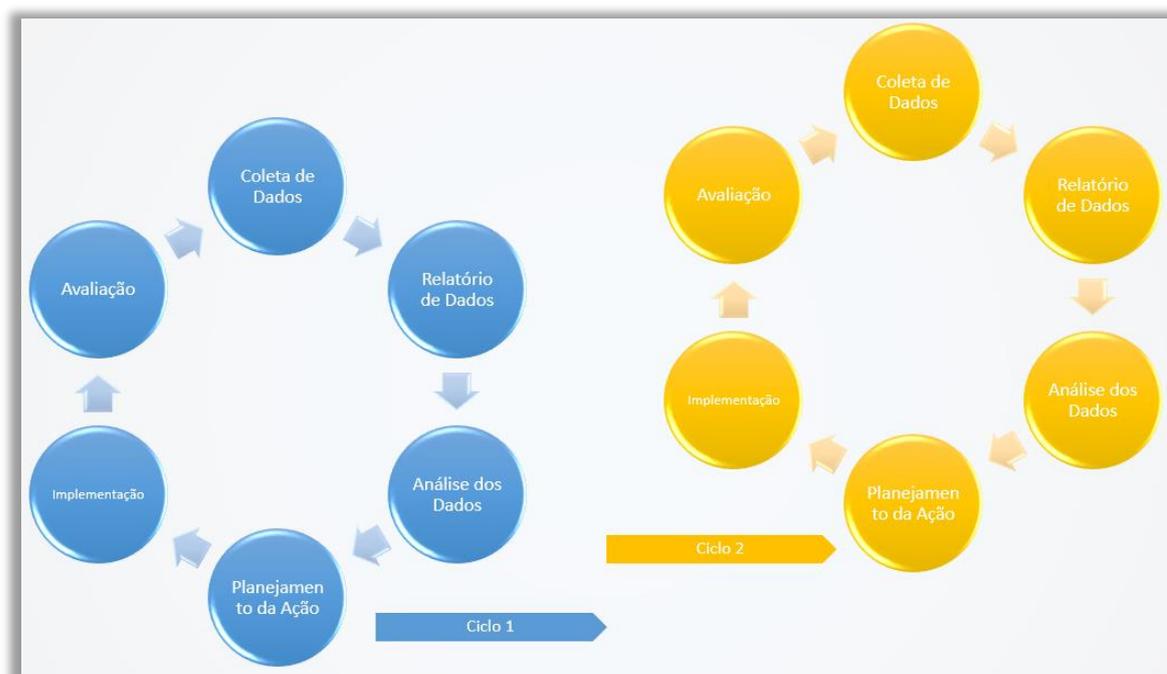
No caso do presente projeto de pesquisa, avaliação da maturidade tecnológica em um projeto de P&D por meio do *Technology Readiness Levels* (TRL), a proposta é validada no ambiente industrial, tendo influência direta do pesquisador que visa vislumbrar as características pertinentes da aplicação da metodologia TRL no projeto de P&D objeto da pesquisa.

A pesquisa-ação conduzida é pertinente e necessária para a mitigação dos riscos inerentes ao ato de inovar, principalmente no processo de P&D devido à demonstração da maturidade tecnológica.

Coughlan e Coughlan (2002) e Mello *et al.* (2011) abordam que a pesquisa-ação é, ao mesmo tempo, uma sequência de eventos que compreende ciclos iterativos e uma abordagem para a resolução de problemas. Os ciclos iterativos compreendem as etapas de coleta de dados,

gerando um relatório de dados aos participantes, a análise dos dados, o planejamento da ação, a implementação e avaliação das ações. Após efetuada a primeira análise do problema, um novo ciclo iterativo é subsequentemente iniciado. A Figura 11 demonstra os ciclos de uma pesquisa-ação.

Figura 11 - Ciclos da Pesquisa-Ação



Fonte: Adaptado Coughlan e Coughlan (2002)

Para a pesquisa-ação conduzida, e apresentada por meio deste trabalho, foram executados dois ciclos iterativos com intervalo dentre eles de dezesseis semanas. Esse intervalo foi estipulado pelos *stakeholders* pois eles acreditaram ser uma janela temporal adequada para averiguação da evolução do projeto de P&D. Nesses ciclos buscou-se empreender a análise da maturidade tecnológica TRL de componentes e montagens que compõem o desenvolvimento do produto objeto do estudo, o Sensor Ultrassônico Industrial, demonstrando assim as nuances da utilização da metodologia TRL em questão.

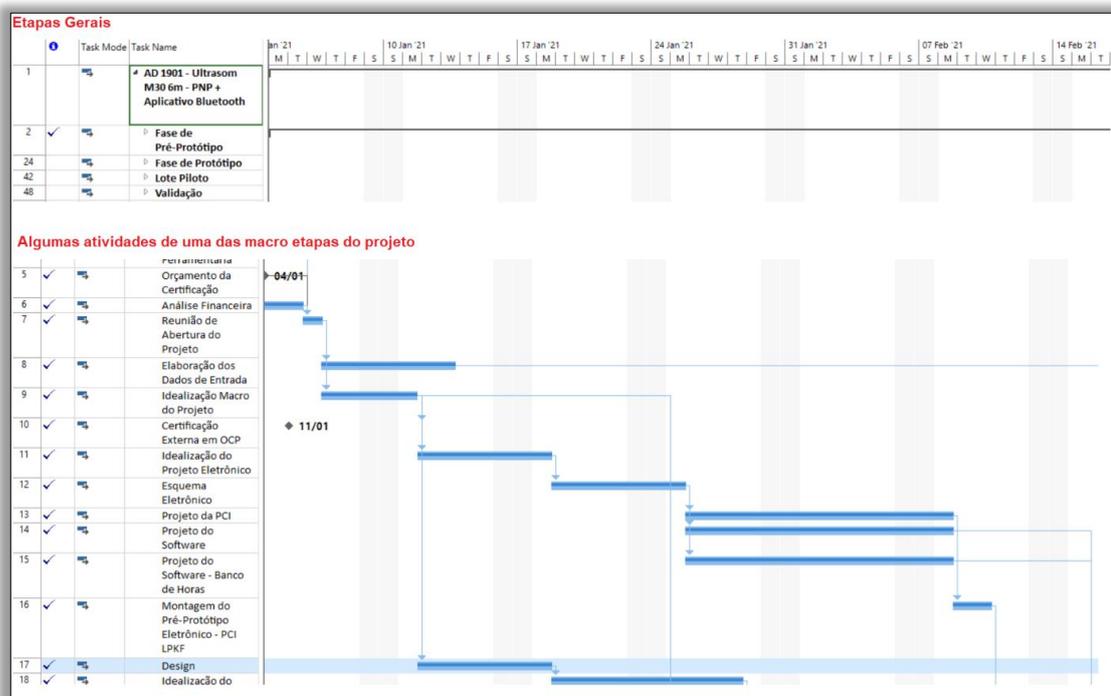
No caso deste presente projeto de pesquisa, a proposta é validada no ambiente industrial, tendo influência direta do pesquisador que visa aplicá-la de modo efetivo, analisando as características pertinentes da metodologia TRL no produto em desenvolvimento.

3.2.1 Planejamento da pesquisa-ação

Inicialmente, foi definido o contexto do estudo a ser realizado, considerando a deficiência apresentada pela empresa Sense para gerir e mensurar a evolução da maturidade da tecnologia durante o desenvolvimento de produtos, principalmente quando o produto a ser desenvolvido ainda não tinha em plenitude o embasamento científico-tecnológico maduro e dominado pela empresa.

Na empresa o desenvolvimento de qualquer projeto é atualmente subdividido em quatro macro etapas que são: 1) Fase de Pré-Protótipo; 2) Fase de Protótipo; 3) Lote Piloto; e 4) Validação. Cada uma dessas fases são subdivididas em fases menores, visando delimitar e acompanhar o andamento dos trabalhos. A Figura 12 demonstra uma pequena parte desse processo, com autorização para ser apresentada. É importante destacar que não existe até então, dentro das etapas, em nenhum momento ou tarefa, algo que formalize ou sistematize a mensuração dos níveis de prontidão tecnológica e, conseqüentemente, todo o planejamento é impactado por esse fato, o que dificulta a gestão assertiva do desenvolvimento do produto.

Figura 12 - Etapas do processo de desenvolvimento de produto na Sense (visão parcial)



Fonte: Próprio autor

Assim, tem-se como etapas estabelecidas para esta fase de aplicação do TRL: 1) definição do produto a ser objeto do estudo; 2) definição do subsistema ou subsistemas a serem

avaliados; 3) definição da análise da montagem do subsistema ou subsistemas a serem avaliados e 4) análise de componente ou componentes específicos referentes ao produto, as montagens e o subsistema.

Como forma de se estudar, estruturar e aplicar a metodologia TRL em um projeto em desenvolvimento presente no *roadmap* de lançamento de produtos da empresa, se fez necessário realizar um processo de seleção. Os gerentes dos departamentos de *Marketing*, P&D e Industrial, juntamente com o engenheiro líder responsável pela linha de sensoriamento da empresa (o próprio pesquisador), definiram que o objeto do estudo deveria ser um sensor ultrassônico industrial.

A justificativa para essa escolha por parte da empresa se fundamenta em visões estratégicas distintas e convergentes que objetivam ter um produto com tecnologia nacional no mercado, visto que existem poucos fabricantes no mundo que dominam as tecnologias envolvidas no desenvolvimento do produto objeto do estudo, devendo este sensor ser mundialmente competitivo, tanto em custo quanto em características de desempenho e tecnologia.

Para este trabalho a proposta é que dois ciclos de análise iterativas sejam executados. O primeiro ciclo diz respeito às montagens denominadas como Transdutor Ultrassônico e Transformador de Acoplamento Eletroacústico.

O segundo ciclo tratará de uma reavaliação da prontidão tecnológica previamente avaliada no primeiro ciclo iterativo e da montagem ligada ao desenvolvimento do bloco denominado PCI (Placa de Circuito Impresso) e sua avaliação quanto a critérios de *Eletromagnetic Compatibility/Eletromagnetic Interference* (EMC/EMI).

3.2.2 Coleta de dados

De acordo com Coughlan e Coughlan (2002), a geração de dados vem do envolvimento ativo no dia a dia dos processos organizacionais relacionados à pesquisa-ação.

Os dados são coletados de diferentes formas, dependendo do contexto, por grupos de observação e por pesquisadores. Existem os chamados dados primários. Esses dados são coletados, por exemplo, por meio de estatística operacional, informes financeiros e relatórios de marketing. Existem, também, os dados secundários, por meio de observação, discussões e entrevistas (COUGHLAN; COUGHLAN, 2002).

Para este presente estudo a coleta de dados foi realizada por meio de análise documental. No caso do relato técnico sobre o andamento do desenvolvimento do produto por parte da

empresa analisada neste estudo, por meio da observação direta do andamento do desenvolvimento do produto e, majoritariamente, por entrevistas estruturadas, tendo como base as questões estabelecidas baseadas na normatização original do TRL, avaliando-se assim questões ligadas ao sistema, subsistemas, montagens e componentes, onde se delimitou aplicar a metodologia em questão. O documento desenvolvido no transcorrer da pesquisa denominado “Guia TRL-Sense” (Apêndice I), uma produção técnica tecnológica, foi o balizador para as entrevistas estruturadas. Foram executadas 20 entrevistas, sendo 9 no primeiro propósito, com a inserção direta na calculadora IMATEC, e 11 no segundo, sendo aqui utilizado o “Guia TRL Sense” desenvolvido nesta pesquisa.

Lincoln e Guba (1985) argumentam que a credibilidade é um dos fatores mais importantes na geração de confiança, logo a triangulação das três fontes de dados apresentadas sustenta a coleta de dados.

3.2.3 Análise dos dados e planejamentos das ações

O aspecto crítico da análise de dados na pesquisa-ação é que ela é colaborativa: tanto o pesquisador quanto os membros do sistema a fazem juntos. A abordagem colaborativa se baseia na suposição de que os elementos conhecem melhor o sistema, sabem o que será funcional e, principalmente, serão os responsáveis por implantar e seguir as ações implantadas; o que torna crucial seu envolvimento na análise (COUGHLAN; COUGHLAN, 2002).

Após coletar os dados é fundamental analisar sua aplicação dentro da metodologia TRL para cada um dos dois ciclos iterativos tratados neste trabalho, realizando, nesse caso, as adaptações pertinentes de forma a computar os níveis de prontidão.

3.2.4 Implementação da ação

Visando identificar as escalas de TRLs de cada subconjunto avaliado em ambos os ciclos iterativos divididos em propósitos, para a primeira iteração foi utilizada a calculadora IMATEC e na segunda a calculadora IMATEC acrescentada do Guia TRL-Sense (Apêndice I).

A produção técnica tecnológica “Guia de aplicação TRL-Sense” foi elaborado com o intuito de se estabelecer um processo para medir o nível de maturidade que possa ser replicado e padronizado, tanto para a aplicação demonstrada neste trabalho quanto para a aplicação futura do TRL, sendo uma contribuição gerencial ao processo de mensuração do TRL.

3.2.5 Avaliação de resultados

Os resultados foram avaliados por meio dos TRLs computados pela ferramenta calculadora IMATEC. De posse dos resultados da avaliação do nível de prontidão tecnológica executados para o primeiro ciclo iterativo, o segundo ciclo foi executado. A análise depende do primeiro ciclo executado anteriormente, após ter atingido um nível de TRL mínimo pré-estabelecido.

Foi também gerado o relatório da pesquisa realizada, sendo apresentado como a dissertação para o Mestrado Profissional em Administração da UNIFEI.

3.2.6 Monitoramento

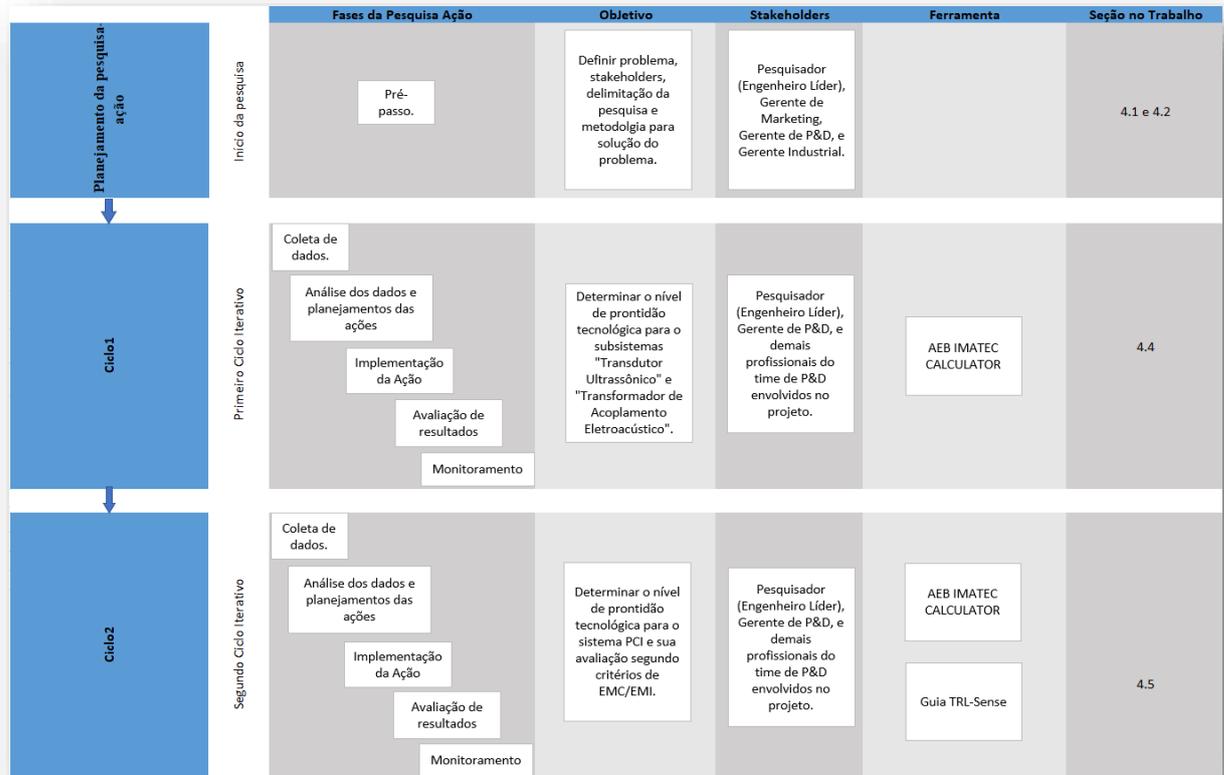
O ciclo da pesquisa-ação envolve mudança e aprendizado: a reflexão conduz para o entendimento e o entendimento compartilhado pelos participantes é realimentado na forma de ação. Esse ciclo continua até que os objetivos da pesquisa sejam atingidos ou abandonados ou até quando os participantes desejarem. Nesse cenário, o monitoramento é uma fase que ocorre em todos os ciclos, pois a oportunidade de aprendizagem é contínua (BALLANTYNE, 2004).

Para isso, neste presente estudo, o monitoramento foi executado por meio de reuniões conduzidas pelo pesquisador, nas quais os demais *stakeholders* envolvidos no processo de desenvolvimento do produto objeto do estudo. A execução da análise do segundo ciclo iterativo somente foi realizada após a análise do TRL do primeiro ciclo, mediante um nível mínimo de maturidade pré-estabelecido (TRL = 5) com averiguação junto aos *stakeholders* envolvidos na pesquisa, no caso os gerentes de *marketing*, P&D, industrial e engenheiro líder.

3.2.7 Fluxo metodológico da pesquisa-ação

Visando sintetizar o fluxo metodológico adotado por este trabalho em relação às macro-etapas da pesquisa-ação, e seu detalhamento, a Figura 13 foi elaborada.

Figura 13- Fluxo metodológico da pesquisa-ação



Fonte: Próprio Autor

Após esta etapa de planejamento, ocorreu a aplicação do TRL conforme estabelecido nos procedimentos metodológicos, permitindo a análise e discussões de acordo com a mesma sequência apresentada no fluxo metodológico, consolidando assim a fase exploratória.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fase exploratória: apresentação da situação-problema (pré-passo)

Para os *stakeholders* envolvidos tornou-se clara a necessidade e potencialidade de se avaliar a evolução da maturidade tecnológica no decorrer do desenvolvimento de produtos inovadores, visando a melhoria dos processos de P&D da empresa. Assim, um produto em desenvolvimento necessitava ser selecionado para a avaliação por meio do TRL.

O produto escolhido foi o sensor ultrassônico industrial devido, principalmente, ao fato de que a maioria das tecnologias a serem dominadas ainda não tinham quaisquer relações com o *know-how* da empresa. No mundo, poucas companhias detém o domínio da tecnologia e a cadeia produtiva deste tipo de sensor, logo os desafios ligados ao processo de P&D da tecnologia não são triviais. Essa escolha teve a anuência dos *stakeholders* envolvidos.

Após essa etapa se fez necessário delimitar quais seriam os primeiros blocos a serem analisados por meio do TRL. Assim, os blocos que compõem o produto tecnologicamente inovador, e que serão avaliados por meio do TRL, são o Transdutor Ultrassônico (TU) e o Transformador de Acoplamento Eletroacústico (TAE), ambos para o primeiro ciclo iterativo, sendo que o projeto Placa de Circuito Impresso (PCI) foi avaliado no segundo ciclo iterativo. No segundo ciclo os blocos TU e TAE também foram reavaliados visando a compreensão da evolução da maturidade tecnológica.

Para a avaliação do nível de maturidade foi utilizada a calculadora IMATEC (Seção 4.4). Nessa ferramenta, é denominado como ‘Sistema’ o produto como um todo. Para o caso desta presente pesquisa, o projeto a ser analisado, e que será considerado como “Sistema”, é o sensor ultrassônico industrial. O próximo subnível do IMATEC trata de um elemento denominado ‘Subsistema’. Os subsistemas são os macro-blocos que compõem o sistema, ou seja, são os grandes blocos nos quais o produto pode ser subdividido. No caso do projeto selecionado, os subsistemas são denominados como: 1) Projeto Eletrônico; 2) Projeto de Software; 3) Projeto Mecânico; e 4) Projeto de Gigas, Dispositivos, Equipamentos e Facilidades. Esta pesquisa está situada dentro do subsistema Projeto Eletrônico para ambos os ciclos iterativos estabelecidos. A Figura 14 mostra essa estrutura.

Figura 14 - Apresentação sistema e subsistemas



Fonte: Próprio Autor

O subnível que existe dentro de um subsistema é denominado como ‘Montagem’. Neste presente projeto de pesquisa as montagens que serão avaliadas por meio do TRL são o TU e o TAE, ambos para o primeiro ciclo iterativo, sendo que a montagem projeto PCI será avaliada no segundo ciclo iterativo. O segundo ciclo também buscou analisar o nível de prontidão tecnológica das montagens TU e TAE a fim de averiguar a evolução da maturidade do projeto no espaço de tempo de 16 semanas.

Dentro de cada montagem podem existir inúmeros componentes, tratando-se do mais baixo subnível contemplado nos blocos avaliados por meio da IMATEC.

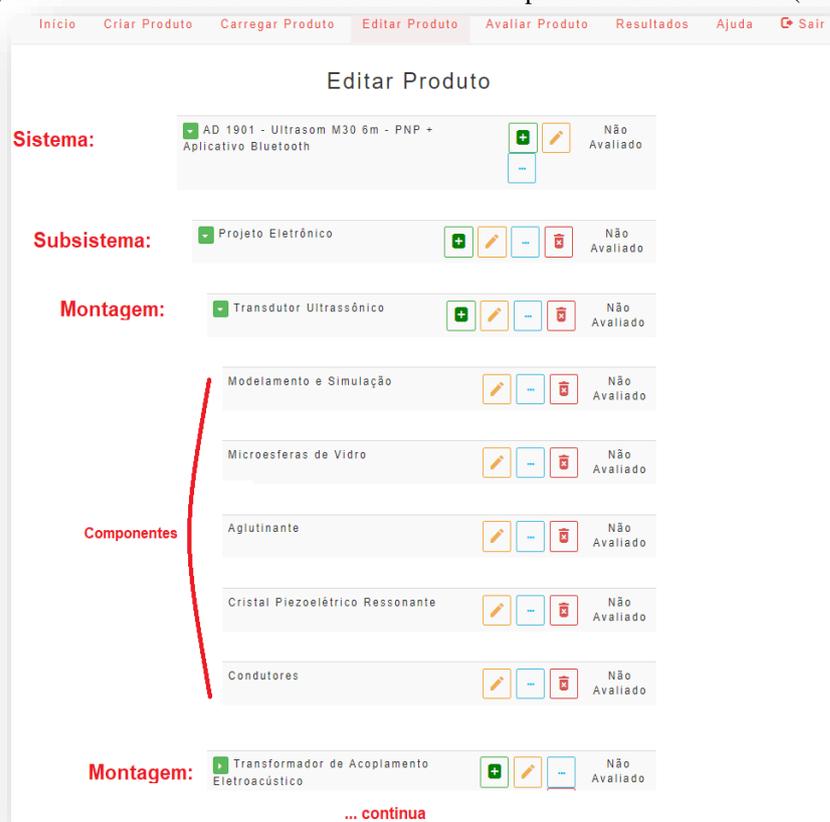
Para o primeiro ciclo iterativo, na montagem TU, foram avaliados os componentes: 1) Modelamento e Simulação; 2) Microesferas de Vidro; 3) Aglutinante e Resina; 4) Cristal Piezoelétrico Ressonante e 5) Condutores.

Já para a montagem do TAE os componentes foram: 1) Modelamento e Simulação; 2) Microesferas de Vidro; 3) Aglutinante e Resina; e 4) Ferrite.

No segundo ciclo iterativo, além das montagens supracitadas, a montagem projeto PCI teve os seguintes componentes avaliados: 1) Fonte Chaveada de Potência; 2) Fonte 3V3; 3) Controlador Lógico / Microcontrolador; 4) Driver de Saída; 5) Módulo BLE e 6) IHM / HALL.

Visando sintetizar os conceitos sobre sistema, subsistemas, montagens e componentes a Figura 15 foi elaborada, tomando como exemplo o modelamento do TAE na IMATEC.

Figura 15 - Modelamento do Transformador de Acoplamento Eletroacústico (TAE)



Fonte: Próprio Autor

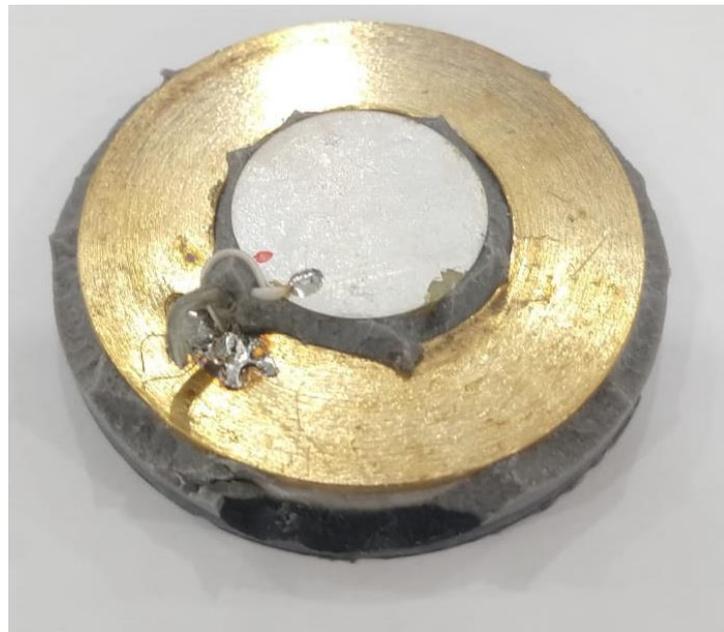
Mesmo apresentando e descrevendo os componentes, montagens, subsistemas e sistema, nenhum dado que envolva diferenciais tecnológicos ou resultados técnicos serão disponibilizados nesta presente pesquisa devido a questões de segredo industrial.

4.2 Fase exploratória: apresentação da tecnologia (pré-passo)

Ao se tratar da concepção tecnológica de um sensor de proximidade ultrassônico, um dos pontos mais críticos do projeto se dá em relação ao TU utilizado. Esse componente deve ser muito bem construído, possuir excelente estabilidade, apresentar distância sensora compatível com a aplicação em campo, dentre outras macro características. Como poucas empresas no mundo detém essa tecnologia, considerou-se estratégico para a empresa objeto do estudo que, nesse projeto, fosse atingida a independência tecnológica para esse componente e a consequente redução de custo do sensor. Assim, optou-se pela pesquisa e desenvolvimento de um transdutor ultrassônico de qualidade visando, inclusive, ampliar o conhecimento quanto a essa tecnologia que até então era desconhecida pela equipe.

O TU é projetado de forma que ocorra transdução de um sinal elétrico em um sinal ultrassônico, ou vice-versa, onde as cerâmicas piezoelétricas são fixadas na parte superior do componente, dentro de um invólucro de alumínio coberto de resina. Uma característica muito importante no desenvolvimento do TU é o casamento de impedâncias. Um eventual descasamento causa grande perda na superfície de radiação de vibração das cerâmicas piezoelétricas. Esse casamento de impedância com o ar pode ser conseguido ligando um material especial à cerâmica piezoelétrica, formando assim uma camada de casamento de impedância, chamada aqui de camada de acoplamento. A Figura 16 ilustra a construção interna de parte de um TU.

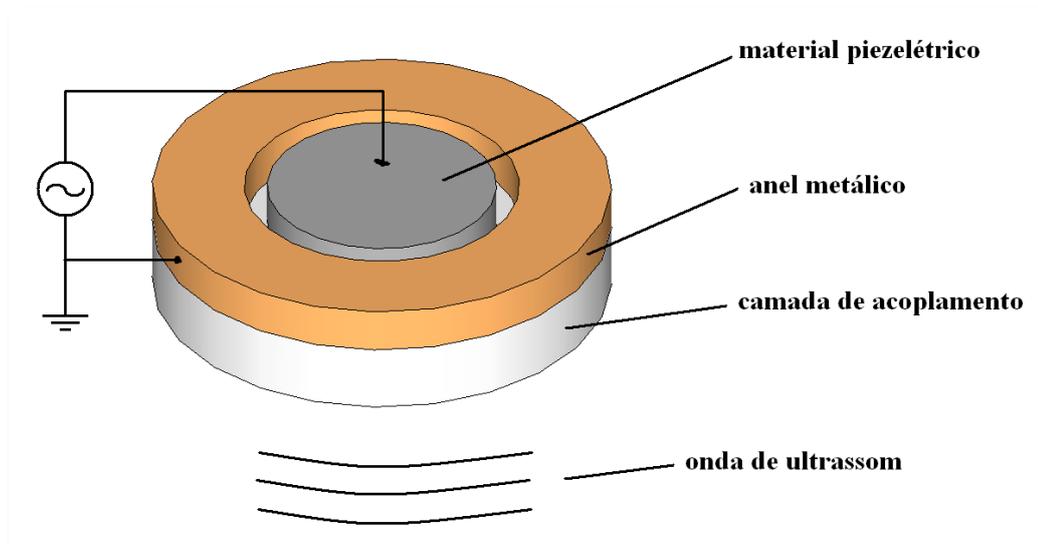
Figura 16 - Construção interna de um Transdutor Ultrassônico (TU)



Fonte: Próprio Autor

O TU é constituído basicamente por um disco de material piezoelétrico, uma camada de acoplamento e um anel metálico. A camada de acoplamento é constituída de microesferas ocas de vidro e resina. Essa camada é colada à cerâmica piezoelétrica e ao anel metálico utilizando cola condutiva onde o desempenho do transdutor é bastante influenciado pela camada de acoplamento. As propriedades mecânicas dessa camada dependem do tipo de microesfera, da concentração de microesferas e da resina utilizada. A Figura 17 apresenta, de forma simplificada, o modelamento básico do TU.

Figura 17 - Modelamento básico do Transdutor Ultrassônico (TU)

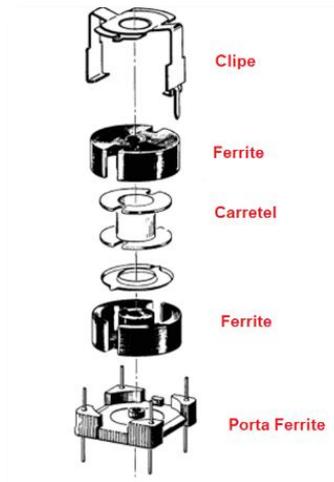


Fonte: Próprio Autor

Já em relação ao TAE foi considerado desafiador por parte da empresa o projeto e construção de um micro transformador de acoplamento entre o transdutor ultrassônico e o circuito condicionador de sinais, de tal forma que o pulso gerado pelo circuito condicionador possa ser acoplado ao TU. Conseqüentemente, fazer com que o eco advindo da reflexão no objeto a ser detectado, com níveis de milivolts, possa ser acoplado do TU para um circuito condicionador microprocessado também é algo nada trivial dentro do desenvolvimento tecnológico.

O TU tem a função de receber o sinal gerado pelo circuito oscilador em seu primário e elevar sua tensão a níveis suficientes para excitar o transdutor ultrassônico. Ele precisa ter uma relação de espiras adequada em seu primário e secundário, para entregar uma tensão que excite a cápsula transdutora o suficiente de forma a se ter a distância sensora necessária. Além disso, características ferromagnéticas do núcleo de ferrite tiveram que ser estudadas, visando especificar aquela que ofereceria desempenho ótimo. Para o projeto objeto de estudo os transformadores operam na topologia de *center-tape*, pois assim se consegue maiores tensões no secundário quando comparado a um transformador sem derivação. A Figura 18 demonstra alguns componentes do TAE em uma perspectiva mais detalhada.

Figura 18 - Vista explodida parcial TAE



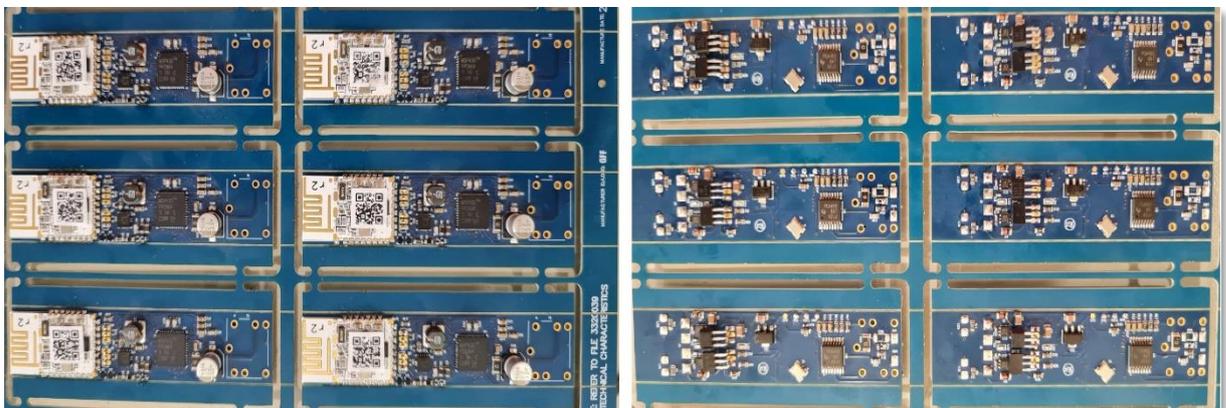
Fonte: Próprio Autor

Como o TU opera com altas tensões e sinais muito complexos, esse transformador passa a ter requisitos construtivos muito especiais e, dessa forma, optou-se também por um desenvolvimento realizado pela própria equipe da empresa em detrimento dos modelos comerciais que, conforme testes realizados, não atendem aos requisitos necessários.

Já o projeto da PCI é a etapa responsável pelo desenvolvimento e integração dos componentes eletrônicos de *hardware* visando o bom funcionamento do produto e a validação de desempenho nos critérios de EMC/EMI em relação a normas internacionais.

A Figura 19 ilustra ambas as faces do projeto de PCI após o processo de montagem em maquinário de inserção automática, solda e inspeção dos componentes eletrônicos.

Figura 19 - Montagem projeto PCI em ambas as faces



Fonte: Próprio Autor

Dadas as características apresentadas para o desenvolvimento das montagens de TU e TAE, esses blocos foram os escolhidos para a avaliação do TRL no denominado primeiro propósito (primeira iteração). Já o segundo propósito (segunda iteração) planejado abordará a análise do TRL ligado ao projeto da PCI e os seus componentes. Em ambos os propósitos a análise se deu por meio da calculadora IMATEC e no segundo propósito também pelo Guia TRL-Sense.

4.3 Coleta de dados e questões estruturadas para a avaliação do TRL

Como o projeto de desenvolvimento tecnológico estava em andamento concomitante ao desenvolvimento desta pesquisa, tanto o primeiro ciclo iterativo, e análise do TRL do TU e TAE, quanto o segundo ciclo iterativo, e análise do TRL do projeto de PCI, foram executados em janelas de tempo que indicaram maturidade tecnológica naquele referido espaço de tempo.

A execução da análise do segundo ciclo iterativo somente pôde ser feita após a análise do TRL do primeiro ciclo atingir um nível mínimo de maturidade pré-estabelecido (TRL = 5) com averiguação junto aos *stakeholders* envolvidos na pesquisa, no caso os gerentes de marketing, P&D, industrial e engenheiro líder.

Já para o segundo ciclo iterativo não foi estabelecido um TRL limite, visto que a análise de maturidade retratou o estado da evolução no instante de tempo em que os dados foram coletados, mas como o prazo de finalização do desenvolvimento tecnológico é previsto para julho de 2022, até lá é esperado que a empresa consiga que o projeto objeto de estudo tenha TRL = 9 para todo o sistema e, conseqüentemente, subsistemas, componentes e montagens.

A coleta de dados foi baseada nas perguntas preestabelecidas pela IMATEC que tem como base a norma ABNT NBR ISO 16290 (ABNT, 2015). Adaptações das questões e sua validação dentro do processo de gestão já consolidado por parte da empresa foram conduzidas de tal forma a se interpretar as nomenclaturas adotadas pela IMATEC e gestão Sense de um modo uniforme.

Questões referentes ao TRL nível 1: Na calculadora IMATEC o denominado ‘Índice 1’ trata da fase cognitiva da criação, ou seja, busca-se debater e formalizar as características desejadas, ou indesejadas, relativos ao desenvolvimento e o que é necessário para o desenvolvimento tecnológico que se inicia. A questão que avalia o TRL = 1 nesta etapa é dada por: (1.1) A fase cognitiva da criação foi concluída?

Traçando um paralelo em relação às etapas definidas no processo de gestão da empresa objeto de estudo, pode-se dizer que o TRL = 1 computa se os dados de entrada para o

desenvolvimento foram concebidos e disponibilizados aos *stakeholders* e se a reunião de *Kick-Off* foi efetuada.

Questões referentes ao TRL nível 2: Já o ‘Índice 2’ trata da fase cognitiva da investigação científica, ou seja, é a etapa que trata da primeira idealização sobre como fazer. A questão que avalia o TRL = 2 nesta etapa é dada por: (2.1) A fase cognitiva da investigação científica (equacionamento de ideias) foi concluída?

A etapa do processo de gestão da empresa objeto de estudo que trata do TRL = 2 é a idealização do pré-protótipo, onde nesse ponto é validada a pesquisa básica da tecnologia.

Questões referentes ao TRL nível 3: Para o ‘Índice 3’, a IMATEC estabelece que se trata da denominada fase analítica da investigação científica. São três as perguntas que balizam o TRL = 3: (3.1) Ensaaios funcionais e simulações foram concluídos? (3.2) Medidas científicas orientadoras foram identificadas? (3.3) Uma prova de conceito de função crítica foi finalizada de forma analítica ou experimental?

No processo de gestão da Sense o TRL = 3 é tratado dentro da etapa denominada como execução Pré-Protótipo. É nessa etapa que se inicia o desenvolvimento tecnológico propriamente dito.

Questões referentes ao TRL nível 4: O ‘Índice 4’ da IMATEC aborda a fase da investigação experimental em laboratório, onde as perguntas para a avaliação da maturidade tecnológica da etapa são: (4.1) Foi realizada a investigação experimental em laboratório? (4.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho do componente foi derivada a partir de requisitos de medidas científicas? (4.3) Testes de laboratório mostraram que o modelo de desenvolvimento cumpre os parâmetros funcionais críticos e de desempenho?

No processo de gestão da empresa objeto do estudo o TRL = 4 é avaliado dentro da etapa denominada como Protótipo-Bancada. Nesta etapa a tecnologia tem que se mostrar funcional, consolidando assim a viabilidade técnica de todas as soluções apresentadas.

Questões referentes ao TRL nível 5: Já o denominado ‘Índice 5’ é descrito como sendo a fase da investigação experimental no ambiente relevante (espaço simulado). Nessa etapa tem-se as questões para a avaliação da maturidade: (5.1) Foram realizadas investigações experimentais em ambiente relevante (espaço simulado)? (5.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho das componentes foram validados no ambiente relevante?

Na gestão da Sense o TRL = 5 é avaliado dentro da etapa denominada como Protótipo-LIT. LIT é o Laboratório Integrado de Testes da empresa e, neste local, diversos testes de conformidade são executados de acordo com padrões internacionais de desempenho.

Questões referentes ao TRL nível 6: O ‘Índice 6’ da IMATEC trata da fase de demonstração do dispositivo em ambiente relevante (espaço simulado). Nessa etapa a questão que trata do TRL = 6 é dada por: (6.1) O componente foi demonstrado em ambiente relevante (espaço simulado)?

Para a gestão da Sense, o TRL = 6 trata de testes iniciais da tecnologia em ambientes de campo simulados internamente dentro da etapa denominada Protótipo-LIT de testes completos.

Questões referentes ao TRL nível 7: Já no denominado ‘Índice 7’ a IMATEC trata da fase de demonstração do protótipo no ambiente operacional. A validação do TRL = 7 é feita por meio da seguinte questão: (7.1) O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?

No processo de gestão Sense o TRL = 7 trata da validação do protótipo em um determinado cliente parceiro por meio da etapa Teste Cliente - Protótipo.

Questões referentes ao TRL nível 8: O ‘Índice 8’ avalia a fase de qualificação do componente (sistema real) em testes e demonstrações. A validação (TRL = 8) é feita por meio da seguinte questão: (8.1) O componente foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional?

Seguindo os processos de gestão da empresa objeto de estudo o TRL = 8 trata da validação de um lote piloto em um determinado cliente parceiro por meio da etapa Teste Cliente - Piloto.

Questões referentes ao TRL nível 9: Por fim, o ‘Índice 9’ trata da avaliação da fase de operação do componente cuja questão apresentada pela IMATEC é: (9.1) O componente encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?

A etapa do sistema de gestão Sense que aborda o TRL = 9 é chamado de validação.

Em uma avaliação completa de todos os subsistemas, montagens e componentes, somente após se atingir o TRL = 9 é possível afirmar que o desenvolvimento da tecnologia ou produto atingiu seu objetivo final.

Visando sintetizar a relação existente entre os níveis do TRL e a etapa do ciclo de vida do desenvolvimento do produto, segundo os padrões preexistentes da empresa objeto do estudo, o Quadro 6 foi elaborado.

Quadro 6. Relação entre o TRL e as etapas do ciclo de vida do desenvolvimento do produto

Nível de prontidão tecnológica	Etapa do desenvolvimento de produto na empresa objeto do estudo	Questões para coleta de dados
TRL 1	Disponibilização dos dados de entrada e reunião de <i>Kick-Off</i>	(1.1) A fase cognitiva da criação foi concluída?
TRL 2	Idealização pré-protótipo	(2.1) A fase cognitiva da investigação científica (equacionamento de ideias) foi concluída?
TRL 3	Execução pré-protótipo	(3.1) Ensaaios funcionais e simulações foram concluídos? (3.2) Medidas científicas orientadoras foram identificadas? (3.3) Uma prova de conceito de função crítica foi finalizada de forma analítica ou experimental?
TRL 4	Protótipo - Bancada	(4.1) Foi realizada investigação experimental em laboratório? (4.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho do componente foi derivada a partir de requisitos de medidas científicas? (4.3) Testes de laboratório mostraram que modelo de desenvolvimento cumprem os parâmetros funcionais críticos e de desempenho?
TRL 5	Protótipo - LIT	(5.1) Foram realizadas investigações experimentais em ambiente relevante (espaço simulado)? (5.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho das componentes foram validados no ambiente relevante?
TRL 6	Protótipo – LIT testes completos	(6.1) O componente foi demonstrado em ambiente relevante (espaço simulado)?
TRL 7	Teste Cliente - Protótipo	(7.1) O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?
TRL 8	Teste Cliente - Piloto	(8.1) O componente foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional?
TRL 9	Validação	(9.1) O componente encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?

Fonte: Próprio Autor

O paralelo efetuado entre a IMATEC e o sistema de gestão da empresa objeto de estudo é fundamentado no nível de sistema. Cada uma das questões para a avaliação se aplica também para os subsistemas, montagens e componentes, onde a interpretação dos níveis varia conforme a *expertise* dos *stakeholders* envolvidos, dada a especificidade de cada desenvolvimento tecnológico.

Uma vez estabelecidas as questões para a coleta de dados e a relação entre o TRL e o sistema de gestão de projetos da empresa objeto do estudo, os *stakeholders* Gerente de P&D, Gerente Industrial e Engenheiro Líder (Pesquisador) se reuniram para averiguar o andamento de cada um dos componentes sob análise visando responder as questões estruturadas.

A reunião de *kickoff* que visava dar início ao processo de P&D do produto tecnologicamente inovador ocorreu em meados de 2019, data anterior ao início desta pesquisa.

Para o primeiro ciclo iterativo todas as reuniões foram conduzidas entre os dias 18 e 22 de outubro de 2021. Já para o segundo ciclo as reuniões ocorreram entre 7 e 11 de fevereiro de

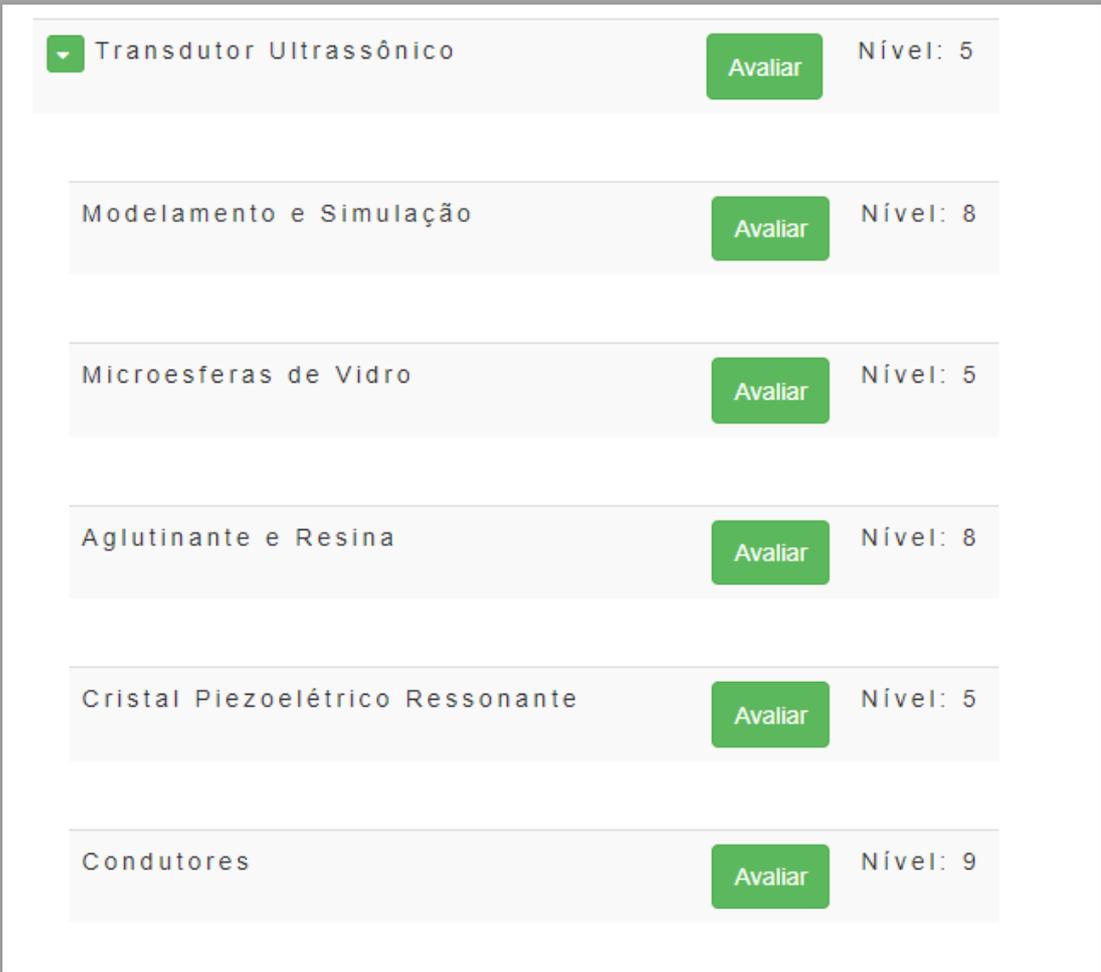
2022. Após a formalização da análise dos dados por meio da IMATEC os resultados foram apresentados aos envolvidos para avaliação nesta mesma janela temporal de cada ciclo.

4.4 Fase de ação: primeiro propósito

O projeto de desenvolvimento tecnológico conduzido pela empresa Sense, objeto do estudo do presente trabalho, está em andamento concomitante ao desenvolvimento desta pesquisa onde não existe interdependência que limite o andamento dos trabalhos em ambas as frentes, tanto desta pesquisa-ação, quanto do processo de P&D do produto.

A Figura 20 apresenta o resultado da avaliação do TRL para a montagem TU e seus componentes considerando a avaliação realizada entre os dias 18 e 22 de outubro de 2021.

Figura 20 - Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica da Montagem TU



Transdutor Ultrassônico	Avaliar	Nível: 5
Modelamento e Simulação	Avaliar	Nível: 8
Microesferas de Vidro	Avaliar	Nível: 5
Aglutinante e Resina	Avaliar	Nível: 8
Cristal Piezoelétrico Ressonante	Avaliar	Nível: 5
Condutores	Avaliar	Nível: 9

Fonte: Próprio autor por meio da IMATEC

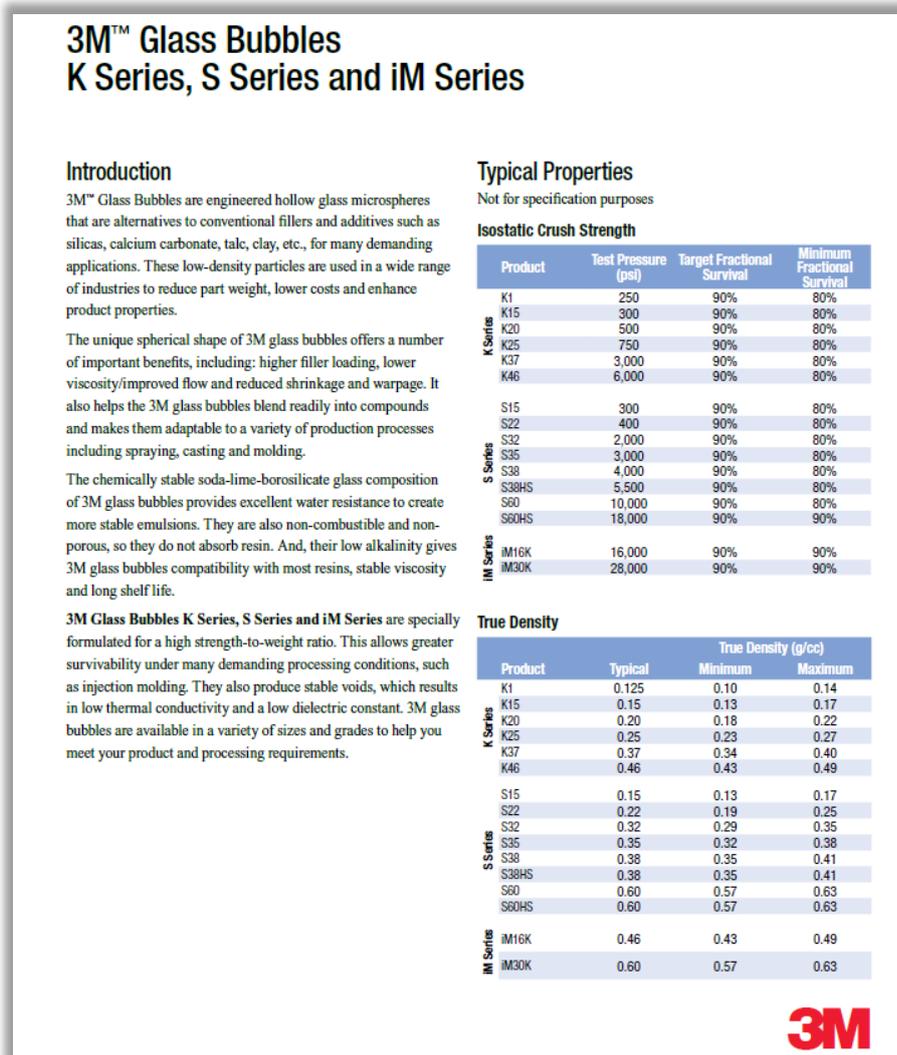
Cada um dos componentes possui justificativas para o TRL atingido conforme análise dos *stakeholders* do projeto de P&D.

Para o componente Modelamento e Simulação os itens de tecnologia chave, ou seja, aqueles parâmetros que devem necessariamente ser simulados foram definidos como sendo a ressonância, diretividade sensibilidade e máxima tensão suportada pelo TU onde se buscou determinar e averiguar parâmetros básicos iniciais por meio de simulações práticas e testes de bancada.

O método de implementação foi definido por meio do time de P&D da Sense utilizando os equipamentos hidrofone modelo 8103, Brüel & Kjaer, osciloscópio digital, gerador de funções, software e *evaluation board Texas Instruments BOOSTXL-PGA460* e software *Solid Works* para concepção mecânica. O TRL = 8 foi atingido para o componente, pois os *stakeholders* acreditam que o componente foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional, no caso, as simulações propostas.

Já para o componente Microesferas de Vidro os itens de tecnologia chave considerados foram condutividade térmica, absorção de óleo, constante dielétrica e densidade real. Esses itens são justificados, pois a escolha da microesfera a ser utilizada no projeto impacta diretamente no resultado esperado. O método de implementação da ação se deu por meio da análise do time de P&D utilizando os materiais 3M™ Glass Bubbles K Series, S Series and iM Series. A Figura 21 apresenta algumas das possibilidades de escolha do componente em questão.

Figura 21 - Opções de microesferas de vidro

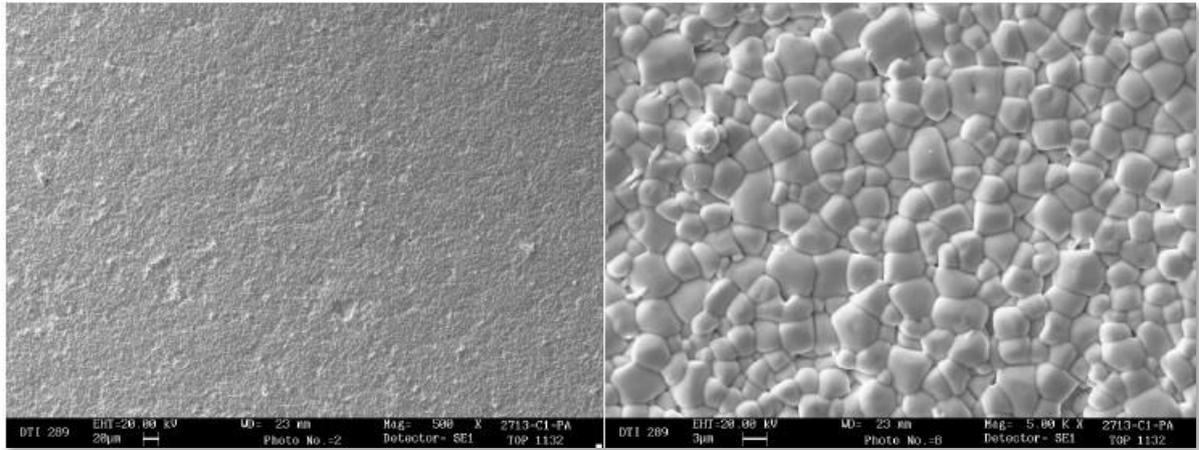


Fonte: Próprio Autor por meio do datasheet 3M™ Glass Bubbles K Series, S Series and iM Series

O TRL = 5 foi atingido para o componente, pois os testes que envolvem o protótipo foram efetuados pelo LIT, estando em conformidade com padrões internacionais de desempenho.

Para os componentes Aglutinante e Resina foram definidos como itens de tecnologia chave os parâmetros dureza, viscosidade, densidade, condutividade térmica, condutividade elétrica, constante dielétrica e percentual de absorção de água sob a justificativa de que a escolha da resina e do aglutinante impacta diretamente no resultado esperado do projeto. A Figura 22 demonstra a junção do aglutinante e as microesferas de vidro em uma imagem microscópica.

Figura 22 - Microesferas de vidro aglutinadas em imagem microscópica



Fonte: Acervo Sense

Foi definido junto aos *stakeholders* que o método de implementação se dá por meio do desenvolvimento de requisitos técnicos pelo time de P&D da Sense, em parceria com um renomado fabricante brasileiro de resinas industriais. O TRL = 8 foi atingido para o componente, pois os *stakeholders* acreditam que o componente foi qualificado com desempenho esperado em testes e demonstrações em ambiente operacional, ou seja, dentro do transdutor operando conforme projetado e testado.

Em relação ao componente Cristal Piezoelétrico Ressonante, os itens considerados como de tecnologia chave são a cerâmica, a frequência de ressonância e a tensão suportada, sob a justificativa de que esse componente é o responsável por converter pulsos elétricos em acústicos e vice-versa, ou seja, é o elemento de maior importância do TU. O método de implementação foi definido de forma que os requisitos sejam estabelecidos pelo time de P&D da Sense em parceria com fornecedor na internacional. A Figura 23 ilustra uma das cerâmicas desenvolvidas durante o processo de P&D do componente.

Figura 23 - Cerâmica utilizada no projeto de P&D



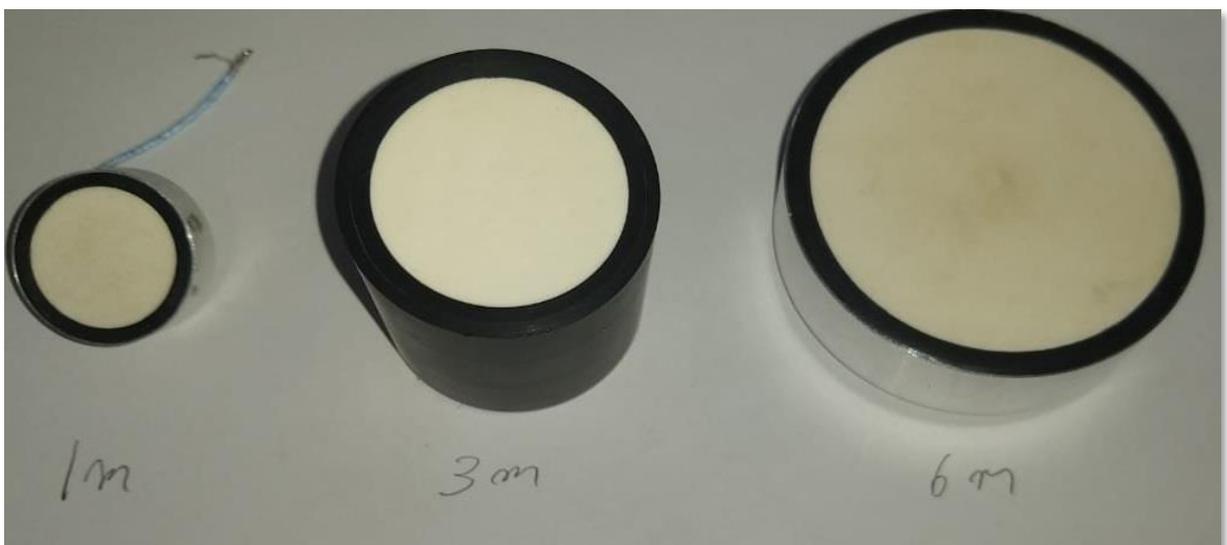
Fonte: Acervo Sense

O TRL = 5 foi atingido para o componente, pois os testes que envolvem o protótipo foram efetuados pelo LIT e estavam em conformidade com padrões internacionais de desempenho.

Por fim, o componente Condutores teve o TRL = 9 atingido, pois já é algo que faz parte do *know-how* da empresa, já se encontra desenvolvido e faz parte de outros produtos da empresa.

A montagem dos transdutores ultrassônicos com todos os componentes citados anteriormente pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 - Transdutores ultrassônicos em processo de P&D



Fonte: Próprio Autor

Ainda dentro do primeiro ciclo iterativo, a montagem do TAE também foi avaliada quanto aos TRLs de cada um dos componentes que os compõem. A Figura 25 traz o resultado da avaliação do TAE e seus respectivos componentes, onde todos eles possuem TRL = 9 durante a janela de tempo avaliada, ou seja, essa montagem se encontra finalizada e consolidada para produção.

Figura 25 - Avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica da Montagem TAE

<input type="checkbox"/> Transformador de Acoplamento Eletroacústico	Avaliar	Nível: 9
Modelamento e Simulação	Avaliar	Nível: 9
Fio de Cobre	Avaliar	Nível: 9
Clipe e Porta Ferrite	Avaliar	Nível: 9
Ferrite	Avaliar	Nível: 9

Fonte: Próprio autor por meio da IMATEC

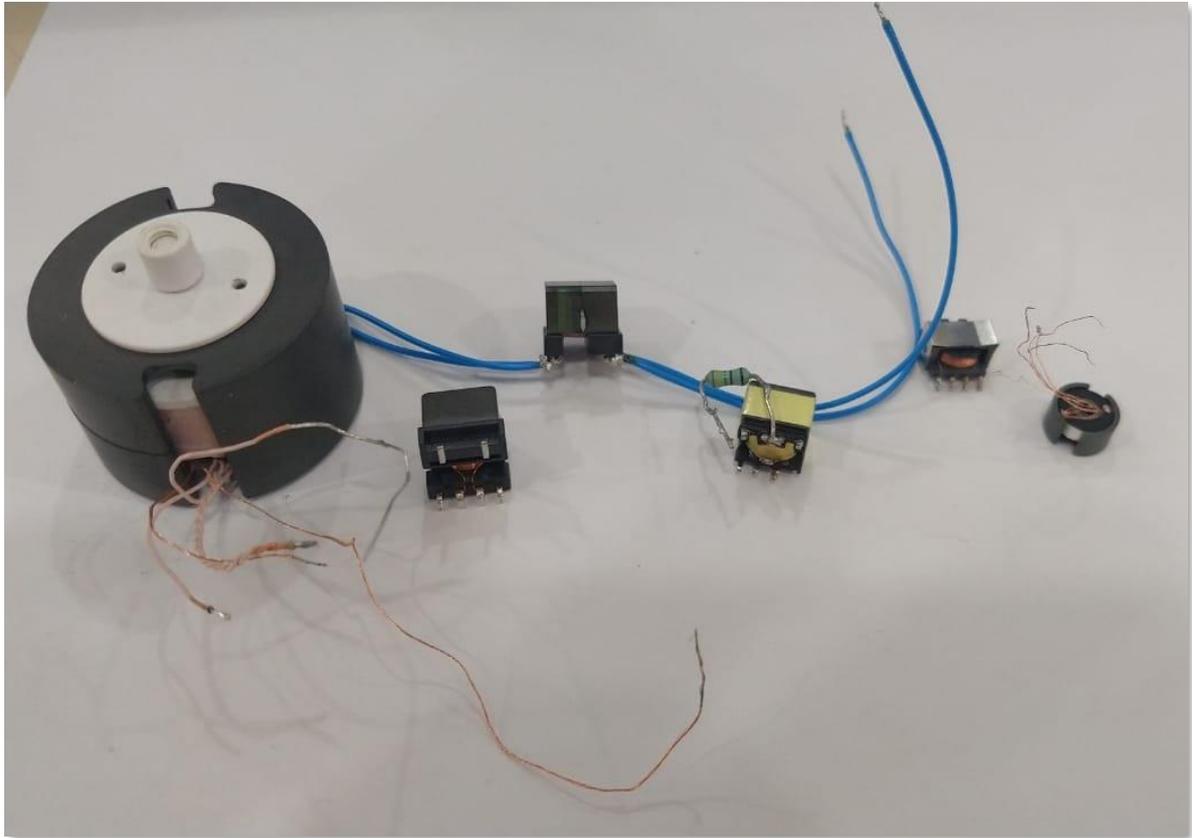
Para o componente Modelamento e Simulação os itens de tecnologia chave, ou seja, aqueles parâmetros que devem necessariamente ser simulados, foram definidos como sendo a máxima transferência de potência, o tamanho e a resposta em frequência. Esses itens se justificam, pois o TAE é o componente responsável por excitar o transdutor em níveis de tensão adequados.

O método de implementação foi definido por meio do time de P&D Sense, utilizando testes empíricos e os softwares TDK *Ferrite Magnetic Design Tool*, TDK *Inductor Loss Calculation Tool* e TINA-TI-SPIICE *based analog simulation program*.

O resultado das simulações e testes empíricos que envolviam a concepção do componente como um todo podem ser verificados na Figura 26 que retrata alguns TAE em

processo de desenvolvimento. O TRL = 9 foi atingido, pois o componente foi validado, tendo sua implantação corroborada na linha de produção da empresa objeto do estudo.

Figura 26 - Evolução dos TAE



Fonte: Próprio autor

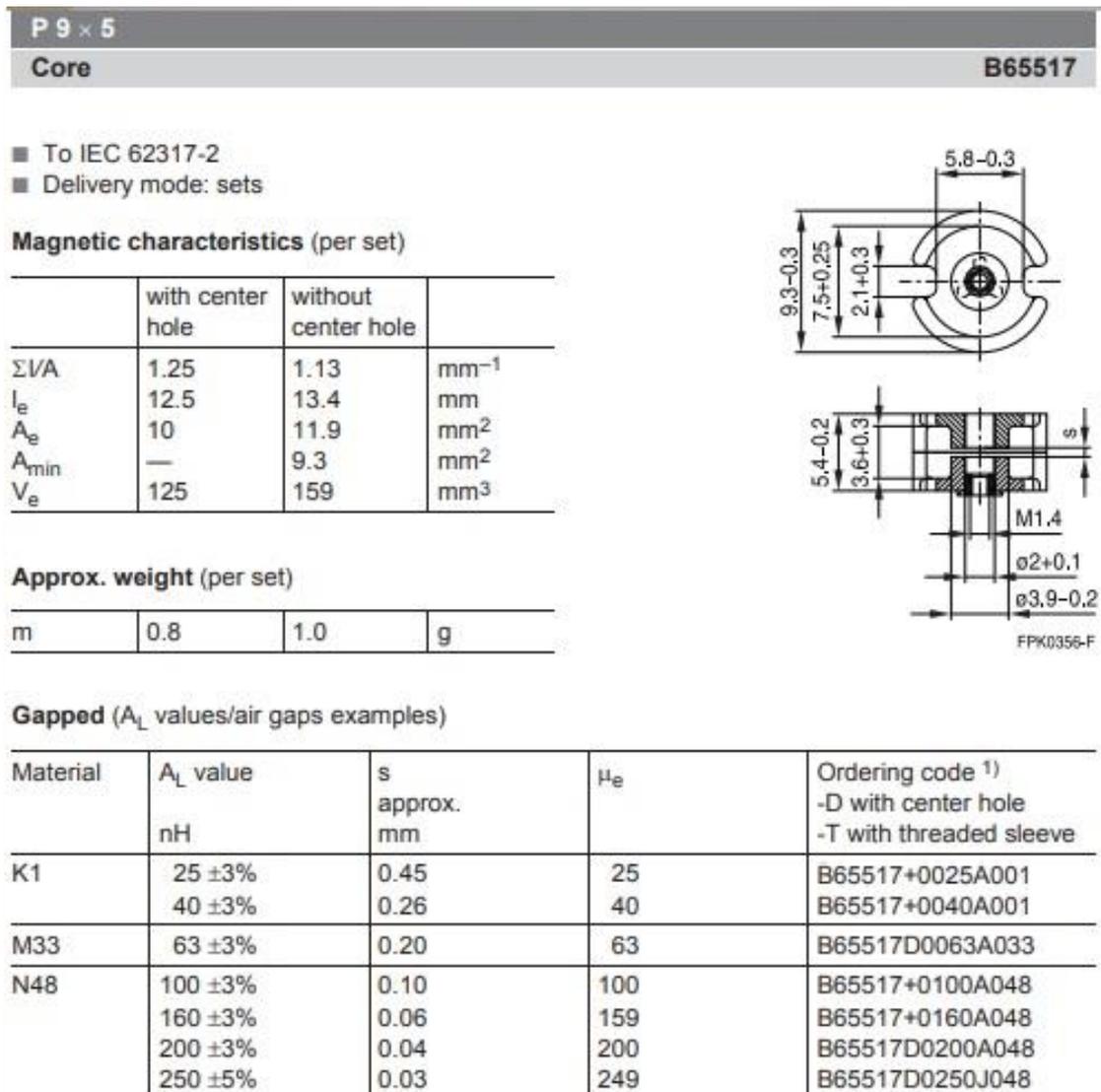
Assim como no caso da montagem TC, para a montagem TAE o componente Condutores teve o TRL = 9 atingido, pois já é algo que faz parte do *know-how* da empresa, já se encontra desenvolvido e faz parte de outros produtos da empresa.

Já para os componentes Clipe e Porta Ferrite, os itens de tecnologia chave foram definidos como sendo o tipo e o tamanho. Esses itens se justificam, pois o componente deve ser adequado para utilização junto ao ferrite adotado no projeto. O método de implementação do componente foi definido pelo time de P&D da Sense. Mais uma vez, o TRL = 9 foi atingido, pois o componente foi validado, tendo sua implantação corroborada na linha de produção da empresa.

Finalizando a avaliação da montagem do TAE, o componente Ferrite foi avaliado, onde os itens de tecnologia chave foram definidos como sendo o tipo, tamanho, fator de dissipação, permeabilidade inicial, densidade de fluxo e fator de indutância. Esses itens se justificam, pois

o componente deve ser adequado para atendimento dos requisitos, tanto dimensionais quanto de desempenho eletromagnético. O método de implementação ocorreu por meio da equipe de P&D alocada ao projeto, utilizando-se do maquinário presente na empresa. A Figura 27 apresenta alguns dos parâmetros estudados para a escolha final do núcleo de ferrite a ser utilizado.

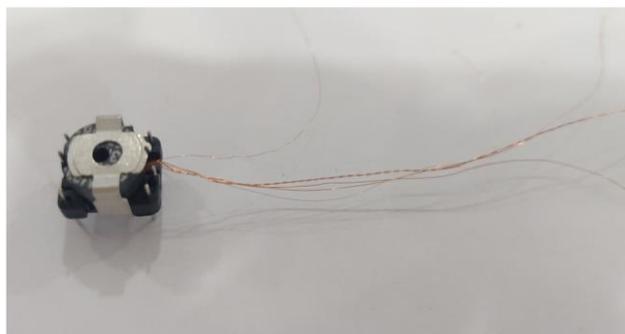
Figura 27 - Parâmetros núcleo de ferrite



Fonte: Próprio Autor por meio do datasheet EPCOS/TKD

Por fim, o TRL = 9 foi atingido e a montagem foi validada, tendo sua implantação corroborada na linha de produção. A Figura 28 ilustra a montagem final produzida pela Sense.

Figura 28 - TAE finalizado



Fonte: Próprio Autor

No primeiro ciclo iterativo a avaliação do TRL, por meio da calculadora IMATEC, e o envolvimento dos *stakeholders* retratou que os componentes TE e TAE já se encontravam em um estágio de maturidade tecnológica evoluído, estando as tecnologias nas etapas de demonstração tecnológica TRL = 5 para o TE e de sistemas testados, aprovados e prontos para lançamento para o TAE, que se encontra em TRL = 9.

Essa primeira etapa da avaliação ocorreu sem maiores intercorrências, visto que o produto tecnologicamente inovador se encontra em desenvolvimento desde o último semestre de 2019. Os primeiros TRLs foram superados antes da avaliação proposta por esta pesquisa-ação. O nível mínimo de TRL = 5 foi verificado, o que habilita a execução do segundo ciclo iterativo para o bloco projeto de PCI.

Para a próxima etapa da pesquisa-ação, será demonstrada a realização do segundo ciclo iterativo no projeto sensor ultrassônico industrial. Os *stakeholders* constataram que o desenvolvimento do produto estava em um patamar adequado, dado o ineditismo e a curva de aprendizado das tecnologias envolvidas.

4.5 Fase de ação: segundo propósito

Neste segundo propósito, objetivou-se efetuar uma reavaliação do andamento da evolução da maturidade tecnológica por meio do TRL das montagens TU e TAE bem como efetuar a avaliação da montagem Projeto de PCI e seus componentes segundo critérios de EMC/EMI.

A lacuna temporal de aproximadamente quatro meses entre os ciclos permitiu averiguar a evolução do desenvolvimento do produto abordado no primeiro propósito bem como

explicitou os desafios relativos à tecnologia ainda por vencer pelo time de P&D alocado no desenvolvimento do produto.

Ainda no segundo propósito, buscando-se a aplicação do TRL e a sistematização de um processo de modo a se complementar a gestão da maturidade tecnológica na empresa, o denominado Guia de aplicação TRL-Sense foi elaborado (Apêndice I). Essa produção técnica tecnológica pôde ser adotada de forma interna, sendo considerado uma ferramenta auxiliar para facilitar o uso da calculadora IMATEC, pois não depende da inserção dos dados em tempo real em caso de indisponibilidade momentânea da ferramenta. A calculadora IMATEC esteve indisponível pelo período de alguns dias durante o transcorrer do segundo propósito. Entre 06 e 31 de janeiro de 2022 a ferramenta ficou fora do ar, onde foi necessário entrar em contato com a AEB para solicitar a possibilidade de reestabelecimento. Assim, o desenvolvimento de uma ferramenta auxiliar, que possa agilizar essa aplicação, se mostrou oportuna.

Como a montagem TAE já havia atingido a maturidade tecnológica (TRL=9) no propósito anterior, sua reavaliação não foi explicitada mas os resultados de maturidade se mantiveram, visto que a montagem se encontrava pronta para lançamento. A Figura 29 apresenta o resultado da reavaliação do TRL para a montagem TU e seus componentes.

Figura 29 - Reavaliação TU

Transdutor Ultrassônico	Avaliar	Nível: 9
Modelamento e Simulação	Avaliar	Nível: 9
Microesferas de Vidro	Avaliar	Nível: 9
Aglutinante e Resina	Avaliar	Nível: 9
Cristal Piezoelétrico Ressonante	Avaliar	Nível: 9
Condutores	Avaliar	Nível: 9

Fonte: Próprio Autor

Cada um dos componentes possui justificativas para o TRL atingido conforme análise dos *stakeholders* do projeto de P&D, onde a montagem TU foi considerada finalizada por atingir a maturidade tecnológica (TRL = 9).

Para o componente Modelamento e Simulação todos os itens de tecnologia chave (ressonância, diretividade sensibilidade e máxima tensão suportada pelo TU) foram atingidos e o modelo teórico foi completamente validado, estando pronto para o lançamento.

O método de implementação foi definido por meio do time de P&D da Sense, assim como no primeiro propósito, entretanto, a validação ocorreu por meio do *hardware* e *firmware* proprietários e desenvolvidos para aplicação comercial no produto em desenvolvimento objeto da pesquisa.

Já os componentes Microesferas de Vidro, Aglutinante e Resina, Cristal Piezoelétrico Ressonante e Condutores também tiveram o TRL = 9 atingidos, os *stakeholders* acreditam que o componente foi qualificado graças à produção em escala industrial por meio de parceiro asiático, estando os componentes em conformidade com o projeto desenvolvido e testado no hardware proprietário. A Figura 30 apresenta parte do primeiro lote produzido, testado e pronto para ser integrado ao produto final da montagem TU.

Figura 30 - Lote final do TU produzido e em estoque



Fonte: Próprio Autor

Para o segundo ciclo iterativo a montagem Projeto PCI foi avaliada pela primeira vez quanto aos TRLs de cada um dos componentes que os compõem.

Esse era o principal enfoque deste propósito no ponto de vista dos *stakeholders*, visto que ainda se tratava de uma parte do desenvolvimento do projeto no qual a tecnologia ainda tinha lacunas conhecidas a serem superadas tecnicamente. A Figura 31 traz o resultado da avaliação do Projeto PCI e seus respectivos componentes, onde a montagem atingiu o TRL = 5 durante a janela de tempo avaliada.

A montagem foi validada na fase inicial da investigação experimental no ambiente relevante do LIT, estando os parâmetros funcionais críticos e de desempenho dos componentes em conformidade com as normas de referência e padrões internacionais de desempenho. Todavia, a maior parte dos componentes já estavam validados em nível de maturidade superior (TRL=8), pois esses componentes foram qualificados em testes e demonstrações em ambiente operacional (teste de campo em cliente).

Figura 31 - Avaliação do Projeto de PCI

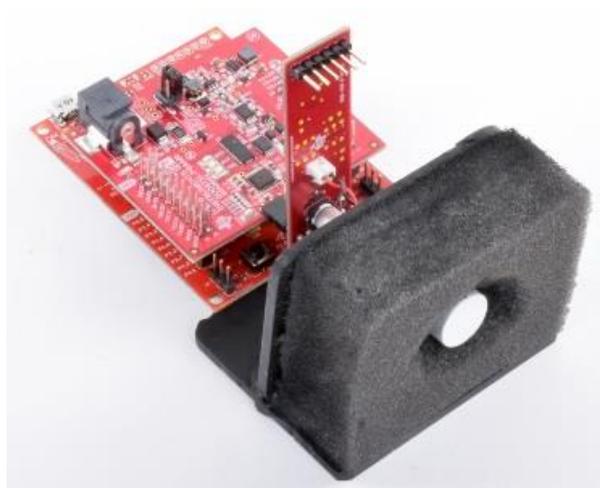
Projeto PCI	Avaliar	Nível: 5
Fonte Chaveada de Potência	Avaliar	Nível: 8
Fonte 3V3	Avaliar	Nível: 8
Controlador Lógico / Microcontrolador	Avaliar	Nível: 8
Driver de Saída	Avaliar	Nível: 8
Módulo BLE	Avaliar	Nível: 5
IHM / HALL	Avaliar	Nível: 8

Fonte: Próprio Autor

Na montagem Projeto de PCI vários componentes são integrados em uma placa de circuito impresso, onde o arranjo de *hardware* projetado deve apresentar o funcionamento em conformidade com o estabelecido. Inicialmente, um *hardware* não proprietário e disponível no mercado foi utilizado como base para o desenvolvimento inicial da tecnologia presente na montagem sob avaliação do TRL. Tal estratégia de desenvolvimento é comum e está em alinhamento com as necessidades da empresa pois visa superar o risco tecnológico das etapas iniciais vislumbradas pelo TRL por meio de uma plataforma comercial que atenda, ainda que parcialmente, os requisitos técnicos do desenvolvimento tecnológico.

Desse modo, o método de implementação inicial para a construção do projeto proprietário foi definido por meio do time de P&D Sense utilizando a *evaluation board* Texas Instruments BOOSTXL-PGA460, que pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 - Texas Instruments BOOSTXL-PGA460



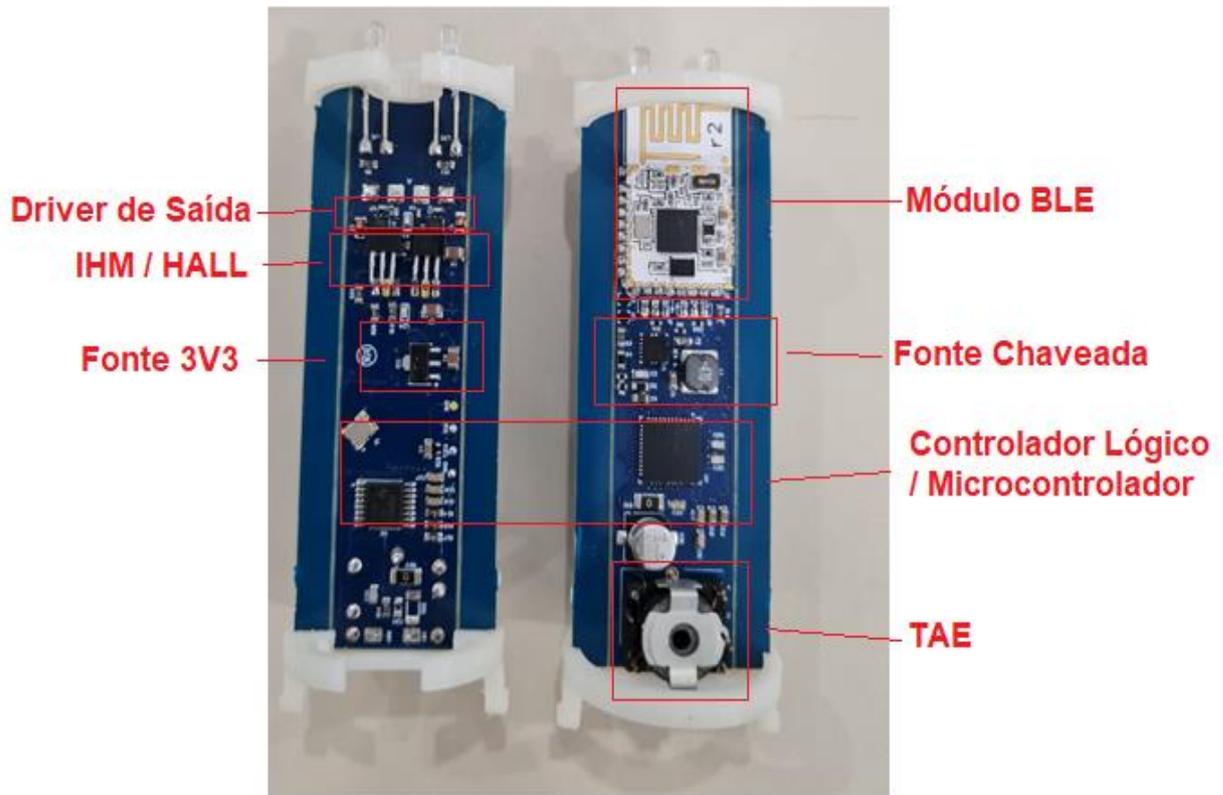
Fonte: Próprio Autor

Após testes iniciais, tomando como base o *hardware* comercial supracitado, o time de P&D envolvido no desenvolvimento do produto tecnologicamente inovador partiu para o desenvolvimento de uma arquitetura proprietária e que atendesse aos requisitos do produto propostos pelos *stakeholders*. Só então a montagem Projeto de PCI foi, de fato, desenvolvida, montagem essa analisada por meio do TRL neste segundo propósito.

É importante destacar que todos os componentes presentes na montagem proprietária do Projeto de PCI são, na verdade, arranjos eletrônicos que cumprem a função de componente conforme a definição do TRL já apresentado e não necessariamente um componente físico único propriamente dito. A junção desses arranjos de blocos de *hardware* eletrônico compõem

o Projeto da PCI. A Figura 33 ilustra como esses componentes estão arranjados no *hardware* proprietário, onde o TAE também foi destacado por estar presente na montagem.

Figura 33 - Componentes da montagem TAE

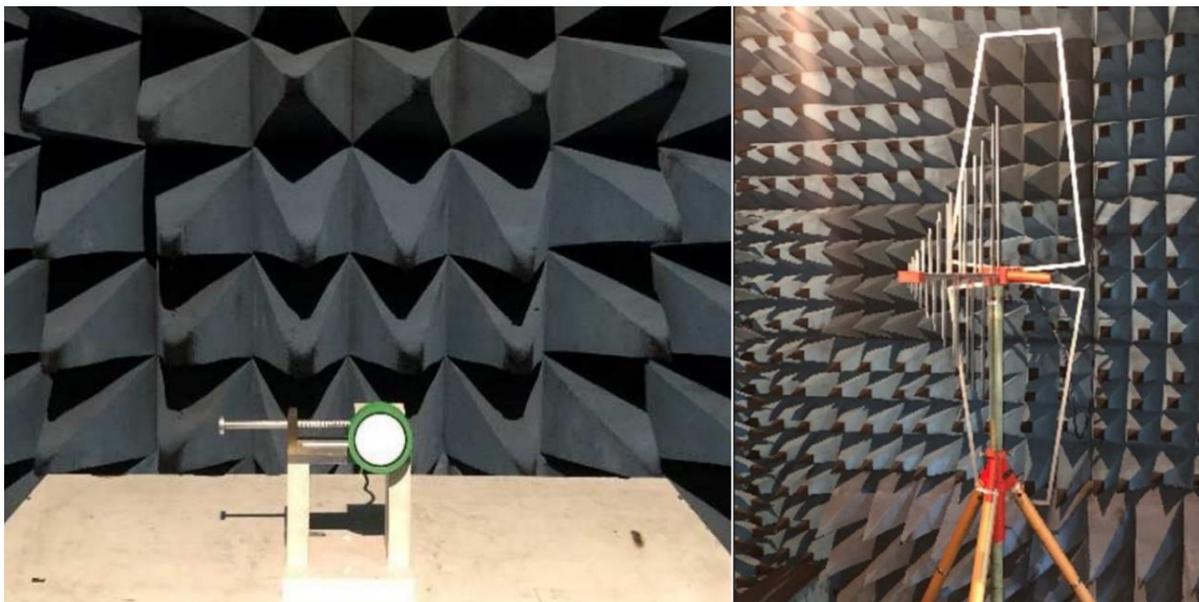


Fonte: Próprio Autor

Para os componentes Fonte Chaveada de Potência e Fonte 3v3, os itens de tecnologia chave são os mesmos e foram definidos como sendo a frequência de chaveamento, o tipo de topologia eletrônica, os níveis de tensão e corrente de nominais, mínimos e máximos de entrada e saída, a geração de perturbações de EMC/EMI e a eficiência energética. Para o componente *Driver* de Saída, os itens de tecnologia chave são os mesmos dos componentes Fonte Chaveada e Fonte 3V3, com exceção da característica frequência de chaveamento, não presente nesse bloco. Desse modo, buscou-se determinar e averiguar os parâmetros básicos iniciais desses componentes por meio de simulações práticas e testes de bancada no *hardware* proprietário desenvolvido.

O método de implementação foi definido por meio do time de P&D da Sense, tomando como base a normatização denominada ABNT NBR IEC/CISPR 11 (ABNT, 2020), sendo os testes executados nos laboratórios da Sense e na câmara anecoica do INATEL, conforme mostra Figura 34.

Figura 34 - Sensor em teste na câmara anecoica



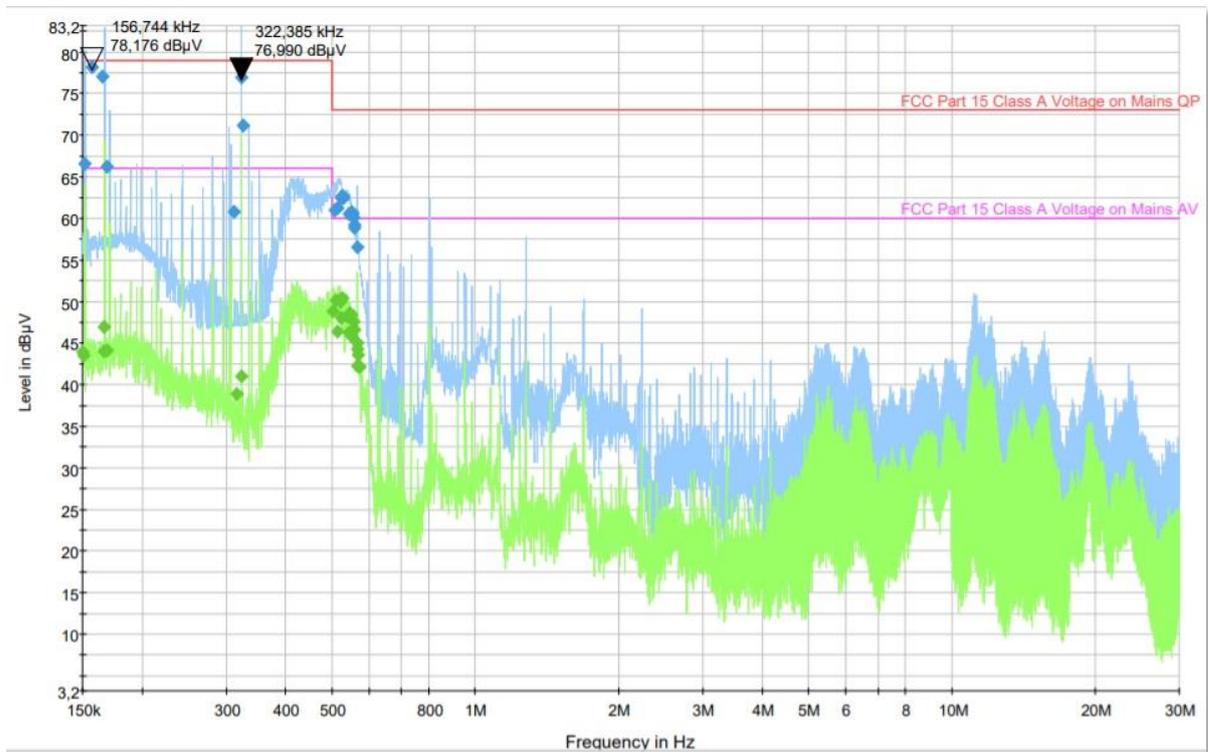
Fonte: Próprio Autor

A norma ABNT NBR IEC/CISPR 11 (ABNT, 2020) é aplicável em equipamentos industriais, científicos e médicos e visa definir as características das perturbações de radiofrequência, estabelecendo limites e métodos de medição. Um dos testes que avaliam o componente em questão é o chamado Emissão Conduzida. Esse teste é um dentre vários que foram executados e envolvem conceitos de EMC/EMI. Os equipamentos utilizados foram a fonte Hameg HM8142, o *EMI Test Receiver* Rohde & Schwarz, o *Line Impedance Stabilization Network*, o cabo de RF e a carga resistiva de 330ohms/5Watts.

Por meio do *software* EMC32, o *EMI Test Receiver* realiza inicialmente a medida utilizando o detector de pico. Após a análise comparativa com os limites da norma, o *software* efetua as análises dos pontos com os detectores de nível médio e/ou de quase-pico.

A fim de ilustrar o resultado do teste para uma das condições avaliadas a Figura 35 foi disponibilizada. O gráfico verde trata do nível de ruído médio e o azul trata do quase-pico, onde esse teste avalia majoritariamente os componentes supracitados. Os picos de ruído radiado não ultrapassaram os valores máximos de quase-pico permitidos (em vermelho) e o valor do ruído médio não ultrapassou a curva de limite do valor médio (em rosa). Como o componente foi aprovado, inclusive em testes de campo, os *stakeholders* avaliaram que o TRL=8 foi atingido.

Figura 35 – Resultado do teste Emissão Conduzida em uma das condições estabelecidas pela norma



Fonte: Próprio Autor por meio do EMC32

Para o componente Controlador Lógico / Microcontrolador diversos testes que envolvem o protótipo foram efetuados em campo, estando em conformidade com padrões internacionais de desempenho.

Foram definidos como itens de tecnologia chave a quantidade e tipo de memória interna, número de pinos de entrada e saída, o tipo e a quantidade de canais seriais de comunicação disponíveis e a capacidade de processamento, sob a justificativa de que a escolha dessas características impacta diretamente no resultado e desempenho esperado do projeto.

O método de implementação se deu por meio do desenvolvimento de *hardware* e *firmware* pelo time de P&D da Sense. O TRL = 8 foi atingido para o componente, sendo que os *stakeholders* acreditam que ele foi qualificado com desempenho esperado em testes e demonstrações em ambiente operacional, estando operando conforme projetado e testado.

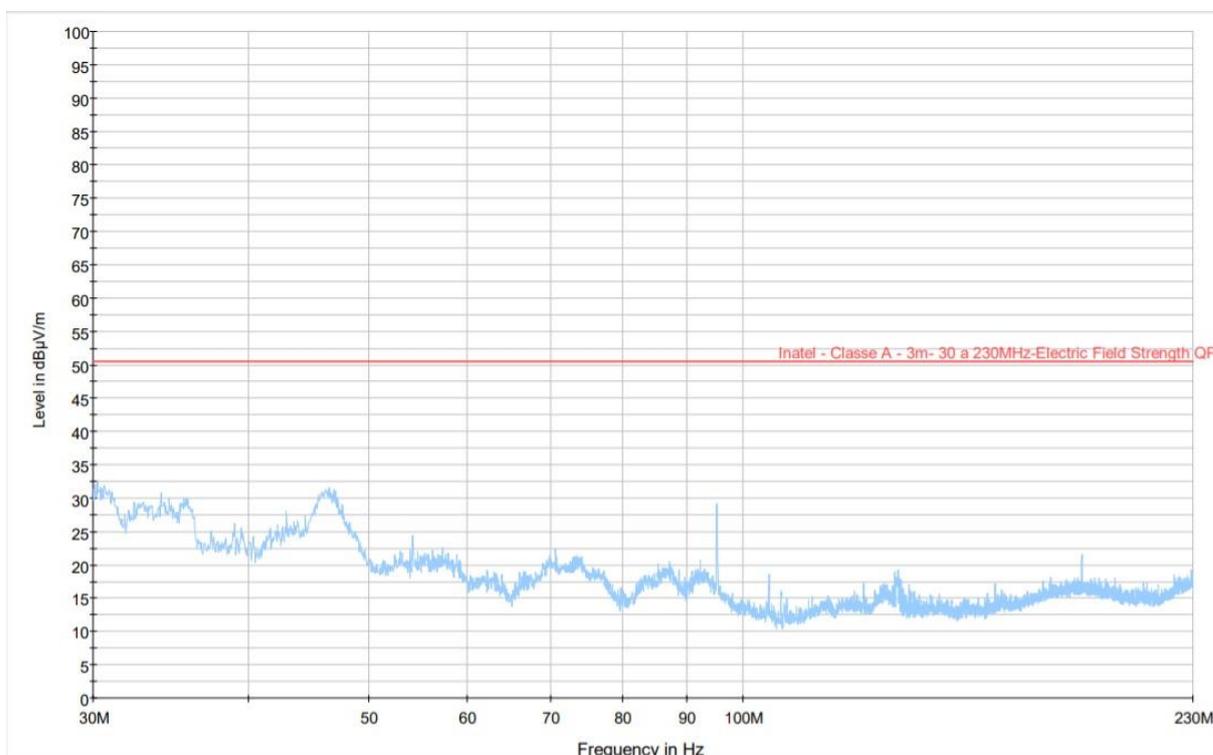
Já no componente Módulo BLE, os itens de tecnologia chave que devem necessariamente ser simulados e testados foram definidos como sendo a taxa de comunicação do BLE, sensibilidade e máxima distância de detecção do sinal *bluetooth*, tensão suportada pelo módulo BLE e potência do rádio, onde se buscou determinar e averiguar os parâmetros básicos iniciais por meio de simulações práticas e testes de bancada e, posteriormente, por meio de

testes laboratoriais em ambiente controlado, sendo o principal teste dessa etapa o chamado Emissão Radiada. Esse teste busca estabelecer os limites de emissão eletromagnética nas faixas de frequência especificadas entre 30MHz-230MHz e entre 230 MHz-1000MHz com detecção medida a três metros de distância do produto em desenvolvimento.

O método de implementação foi definido por meio do time de P&D da Sense utilizando os equipamentos osciloscópio digital, analisador de espectro, gerador de funções, *software* terminal para comandos AT, antena dipolo bi cônica para primeira faixa de frequências (20MHz-300MHz) Rhode & Schwarz, antena log-periódica para a segunda faixa de frequências (80MHz- 3000MHz) Frankonia, EMI *Test Receiver* ESCI – Rohde & Schwarz e Câmara Anecoica.

A Figura 36 demonstra as emissões radiadas do produto tecnologicamente inovador para uma das condições de teste na polarização horizontal com análise na primeira faixa de frequências estabelecidas. A linha vermelha denota o limite máximo permitido por norma enquanto a curva azul representa as emissões radiadas do produto.

Figura 36 - Emissão radiada na polarização horizontal entre 30 a 230MHz.



Fonte: Próprio Autor por meio do EMC32

O TRL = 5 foi atingido para o componente, os *stakeholders* acreditam que ele foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional, estando em conformidade com

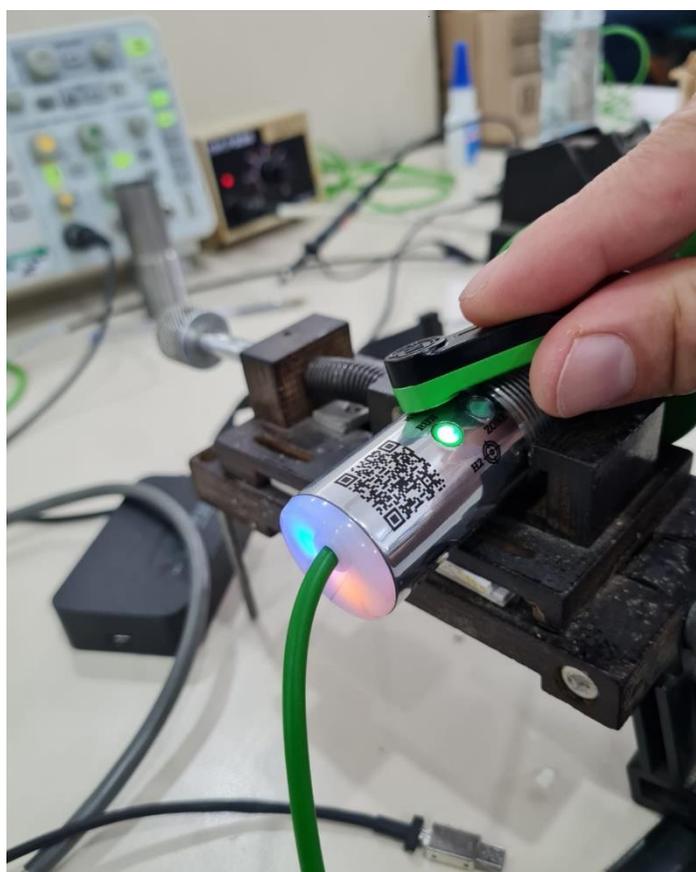
as normas internacionais de referência. Entretanto, testes de campo ainda são necessários para que o componente possa ser classificado em TRL de níveis superiores.

Por fim, o componente IHM/HALL trata do arranjo de componentes eletrônicos capazes de permitir que exista uma interface de comunicação homem-máquina, ou seja, avalia a forma de interação do usuário com o produto e as tecnologias em desenvolvimento.

O sensor possui indicadores luminosos que servem de indicativos de funções conforme a aproximação de uma chave magnética. O acionador magnético, quando aproximado em partes específicas do tubo do sensor, é capaz de ser percebido em chaves magnéticas por meio do efeito *Hall*, onde toda interação com o sensor pode ser feita desse modo. Existem duas chaves magnéticas contempladas no projeto, H1 e H2.

A Figura 37 ilustra a aproximação do acionador magnético na chave magnética H1 para execução de uma função específica dentro do menu de programação do sensor, exemplificando a função prática do componente IHM/HALL, encerrando e delimitando, assim, as análises estabelecidas nos dois propósitos previstos para esta pesquisa.

Figura 37 - Exemplo de funcionamento do IHM/HALL



Fonte: Próprio Autor por meio do EMC32

4.6 Análise dos resultados e monitoramento

Ao se empreender uma análise crítica após a aplicação do TRL em algumas etapas de um projeto tecnologicamente inovador, onde boa parte da tecnologia até então não era dominada pela empresa, pôde-se averiguar a sua importância e como o seu uso pode vir a trazer benefícios para outras empresas que possuem departamentos de P&D. Graças à metodologia foi possível identificar no projeto em questão os níveis de prontidão tecnológica em janelas de tempo específicas, validando sua viabilidade para retratar a maturidade do desenvolvimento tecnológico. Algumas considerações foram realizadas pelos *stakeholders* referentes à utilização do TRL na empresa, sendo: (a) de fato o TRL tem o potencial para ser uma ferramenta auxiliar de mitigação dos riscos em empresas de base tecnológica. (b) Quando os níveis de prontidão tecnológica sob análise ainda se encontram em níveis mais baixos é possível redirecionar o desenvolvimento da tecnologia e técnicas escolhidas para obtenção do resultado esperado, enquanto nos TRL mais elevados o projeto tende a sofrer apenas refinamentos, até que se atinja a maturidade tecnológica. (c) O TRL é uma estrutura simples e uma ferramenta auxiliar de gestão eficaz.

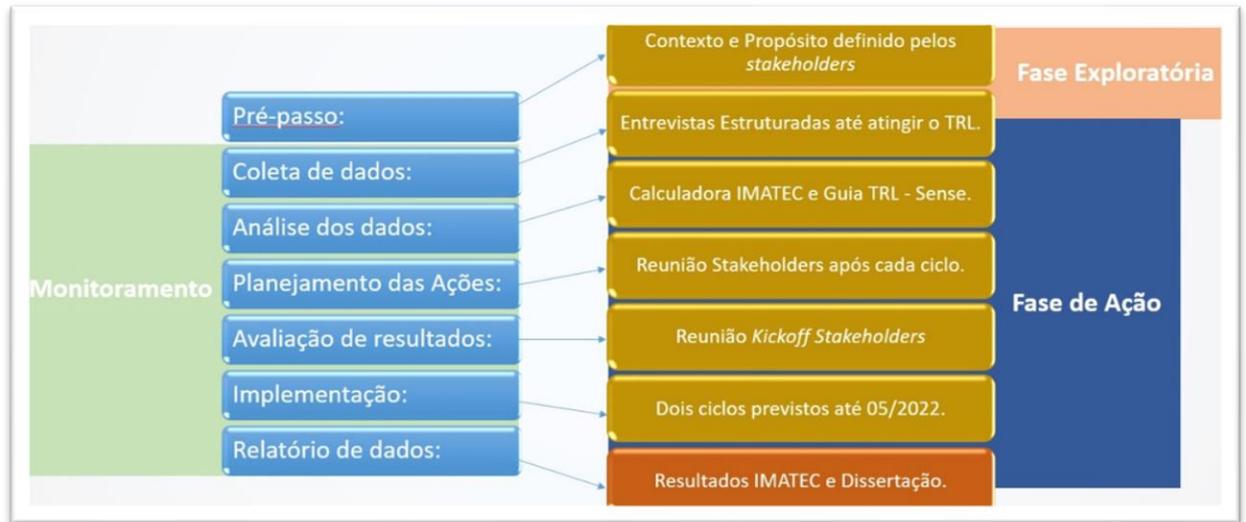
As considerações (a) e (b), realizadas pelos *stakeholders*, vão ao encontro das pesquisas realizadas por El-Khoury e Kenley (2014) e Ribeiro (2019) em que enfatizam o emprego do TRL como uma metodologia para a avaliação da maturidade tecnológica, e consequente tomada de decisão, em um projeto de P&D. A consideração (c), relacionada à simplicidade metodológica, é corroborada pelas pesquisas realizadas por Lavoie e Daim (2017).

O fato de que o produto em desenvolvimento já se encontrava em processo de P&D no início da pesquisa fez com que a potencialidade da análise e tomada de decisão em TRLs mais baixos não pudesse ser plenamente averiguada em todos os blocos do produto tecnologicamente inovador, visto que muitas das etapas já haviam sido vencidas. Entretanto, a avaliação segundo a metodologia perpassou por todos os níveis de maturidade, validando o estudo e corroborando a sua aplicabilidade.

A calculadora IMATEC tomada como referência se mostrou eficaz, mas uma ferramenta gerencial complementar teve que ser desenvolvida, a produção técnica tecnológica denominada “Guia TRL-Sense” visando tornar a averiguação mais simplificada e ágil, se ajustando, dessa forma, aos processos já existentes na empresa. Trata-se, portanto, de ferramentas complementares, sendo muito provável que outras empresas que venham a utilizar a calculadora IMATEC também criem processos e ferramentas gerenciais complementares para auxílio ao cômputo do TRL.

Visando resumir e consolidar sobre como foi estruturada a implantação desta pesquisa-ação, a Figura 38 foi elaborada.

Figura 38 – Resumo da implantação da pesquisa-ação



Fonte: Próprio Autor

Pode-se perceber, a partir do resumo apresentado na Figura 38, que a pesquisa foi conduzida de forma a abordar todas as etapas propostas em uma pesquisa-ação, permitindo, dessa forma, a sua replicação, se necessário.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a implantação da metodologia TRL para a medição do nível de maturidade tecnológica das diversas etapas que compõem um projeto inovador de P&D a partir da aplicação em uma empresa da área de automação industrial. Com relação ao objetivo geral, considera-se que foi atingido a partir da realização dos dois propósitos estabelecidos. Sendo que no primeiro propósito foi possível demonstrar a evolução da maturidade tecnológica das montagens TAE e TU e no segundo propósito do Projeto de PCI, assim como dos respectivos componentes, montagens, subsistemas e sistema, trazendo luz à evolução do desenvolvimento tecnológico por meio da metodologia TRL.

Ressalta-se que a aplicação do TRL trouxe um maior controle e gestão sobre os pontos de evolução necessários ao desenvolvimento de produtos e tecnologias e fará com que se maximize a eficácia no processo de P&D. Esses resultados podem colaborar com a redução dos custos e prazos, levar a empresa a se tornar mais competitiva no mercado e levar a uma maior satisfação dos *stakeholders*, respondendo, assim, à Q1 estabelecida.

Com relação ao objetivo específico relacionado a apresentar as contribuições da implantação da metodologia TRL em empresas de base tecnológica, a análise que este trabalho fez das obras que tratam da produção científica mundial ligada à utilização da metodologia TRL, e que estão relacionadas ao desenvolvimento de produtos inovadores ou com tecnologias inovadoras e ferramentas, trouxe diversas implicações. Os trabalhos analisados demonstraram ser possível evidenciar a importância da utilização dessa metodologia para auxiliar e explicitar com eficiência o risco tecnológico presente em cada etapa do desenvolvimento de um sistema/produto tecnologicamente novo ou com a tecnologia não dominada pelo grupo envolvido no desenvolvimento. A maior parte dos projetos de P&D no universo pesquisado apresentaram ligações com o setor militar ou com projetos de importância governamental, enquanto empresas privadas de base tecnológica que utilizavam a metodologia não foram especificamente destacadas. Também foi evidenciado o uso das ferramentas para a análise do nível de maturidade tecnológica ou do desenvolvimento de novas tecnologias que vêm sendo utilizadas em associação com o TRL ou metodologias propostas para análise do nível de maturidade que dela derivam. Uma agenda futura, referente a esse contexto, pode envolver a aplicação da metodologia em projetos de setores industriais específicos, tratando das virtudes e fraquezas do TRL ou ainda dos desafios e publicações brasileiras, visto que a metodologia faz parte da análise para fomentos à tecnologia e inovação de diversos órgãos governamentais brasileiros e o número de publicações que envolvem o tema ainda é consideravelmente baixo e

pouco explorado. Em síntese, essa etapa revelou a potencialidade de aplicação e de aprofundamento técnico, teórico, metodológico e analítico que a metodologia TRL fornece para campos multivariados de estudos, com grande potencial para ser explorado em pesquisas na área de Administração, vislumbrando não somente avanços científicos, mas possibilidades promissoras de fomento à inovação tecnológica nos mais variados projetos, sistemas e modelos de negócios.

Com relação ao segundo objetivo estabelecido, de se identificar em um projeto de P&D quais são os níveis de prontidão tecnológica em cada uma das etapas e quais são as tecnologias que compõem o seu desenvolvimento, considera-se que foi atingido. A efetividade da análise dos níveis de prontidão tecnológica dos subsistemas, montagens e componentes atendeu às expectativas dos envolvidos, onde todas as etapas, métodos de implantação tecnológica e itens de tecnologia foram definidos e analisados por meio da metodologia e das ferramentas utilizadas no decorrer da pesquisa.

Esta pesquisa também resultou em uma importante contribuição tecnológica, a associação das etapas do TRL, e sua interpretação para a adaptação das questões, às fases de desenvolvimento de um produto inovador. Esse resultado pode facilitar o entendimento da metodologia por outras organizações e permitir a sua replicação. Entretanto, como a decisão sobre os níveis adequados de maturidade tecnológica dependem da avaliação dos *stakeholders*, o TRL apresenta relativa subjetividade na análise de seus níveis. Nesse sentido, as questões norteadoras, baseadas em normatização internacional, podem mitigar possibilidades de classificações que não representem a realidade, mesmo que adaptações possam ser necessárias dependendo do tipo do projeto e tecnologias a serem analisadas.

Por fim, considera-se que o objetivo específico de validar o estudo por meio da implantação e verificação de resultados em um projeto de P&D real, de forma a integrar a metodologia aos processos de gestão de projetos já existentes na empresa, criando um novo processo, foi atingido parcialmente. Ficou claro que a metodologia TRL pode ser integrada aos processos gerenciais da empresa, o que possibilita responder à segunda questão de pesquisa (Q2), mesmo que a sua completa implantação não tenha sido possível no decorrer deste trabalho.

Ressalta-se que existem políticas de qualidade e de normatização de processos que deverão ser atualizados para a inclusão dessa nova ferramenta aos processos atuais. Ademais, um novo projeto fará uso dos resultados obtidos, partindo desde o início (TRL=1) e permitindo, dessa forma, a completa integração aos processos da empresa. Esta pesquisa balizará a aplicação do TRL nesse novo projeto e, também, poderá vir a ser utilizada como um referencial

para outras empresas de base tecnológica, visto que a aplicação da metodologia foi claramente demonstrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEB. **IMATEC Calculator**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2020. Disponível em: <http://imatec.aeb.gov.br/#/main>. Acesso em: 08 abr. 2021.

ANDERSEN, Paul Marius. **Nível de prontidão da tecnologia e grau de abertura da inovação em projetos de P&D&I**: modelo conceitual e aplicação ao caso de uma empresa do setor de óleo e gás. 2019. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL – EMBRAPPII. **MANUAL DE OPERAÇÃO EMBRAPPII**. 2020. Disponível em: https://embrapii.org.br/wp-content/images/2020/10/Manual_EMBRAPPII_UE_versa%CC%83o_6.0-de-20.10.20.pdf. Acesso em: 14 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 16290:2015**: Sistemas espaciais — Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC CISPR11**: equipamentos industriais científicos e médicos – Características das perturbações de radiofrequência – Limites e métodos de medição. ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DAS EMPRESAS INOVADORAS - ANPEI. **Guia da Lei do Bem**: o que é inovação para a lei do bem?. Brasília: Letras & Artes Comunicação, 2017. Disponível em: <https://materiais.anpei.org.br/guialeidobem>. Acesso em: 14 abr. 2021.

BORNER, K.; SANYAL, S.; VESPIGNAN, A. Network Science. **Annual Review Science and Technology**, v. 41, n. 12, p. 537-607, 2007.

CAMARK, W. *et al.* Technology readiness levels for advanced nuclear fuels and materials development. **Nuclear Engineering and Design**, [s. l], v. 313, n. 3, p. 177-184, maio 2017.

CARVALHO, Hélio Gomes de; REIS, Dácio Roberto dos; CAVALCANTE, Márcia Beatriz. **Gestão da Inovação**. Curitiba: Aymar, 2011. 138 p.

COUGHLAN, P.; COUGHLAN, D. Action research for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. A Distinctive Analysis of Case Study, Action Research and Design Science Research. **Review Of Business Management**, [S.L.], p. 1116-1133, 24 nov. 2015.

EARTO - EUROPEAN ASSOCIATION OF RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANISATIONS. **The TRL scale as a research & innovation policy tool, EARTO recommendations**. 2014. Disponível em: http://www.earto.eu/index.php?id=28&type=0&jumpurl=uploads%2Fmedia%2FThe_TRL_Scale_as_a_R_I_Policy_Tool_-_EARTO_Recommendations_-

_Final.pdf&juSecure=1&locationData=28%3Att_content%3A2012&juHash=e11b28c87d23bfb626f77b46a594cd6530c12a98. Acesso em: 27 fev. 2021.

EL-KHOURY, Bernard; KENLEY, C. Robert. An Assumptions-Based Framework for TRL-Based Cost and Schedule Models. **Journal Of Cost Analysis And Parametrics**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 160-179, 2 set. 2014.

EUROPEAN COMMISSION. **About the European Commission**. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/about-european-commission_en. Acesso em: 21 abr. 2021

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. **FAB realiza primeiro teste de voo do motor aeronáutico hipersônico 14-X**. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/mostra/38395/OPERA%C3%A7%C3%A3O%20CRUZEIRO%20%20FAB%20realiza%20primeiro%20teste%20de%20voo%20do%20motor%20aeron%C3%A1utico%20hipers%C3%B4nico%2014-X>. Acesso em: 03 jan. 2022.

FICO, Vito Mario *et al.* High Technology Readiness Level Techniques for Brushless Direct Current Motors Failures Detection: a systematic review. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 7, p. 1573-1 abr. 2020.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Mauricio Gomes. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 183-184, mar. 2014.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GARZA-REYES, Jose Arturo. Lean and green – a systematic review of the state of the art literature. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 102, p. 18-29, set. 2015.

HANNIGAN, Timothy R.; SEIDEL, Victor P.; YAKIS-DOUGLAS, Basak. Product innovation rumors as forms of open innovation. **Research Policy**, [S.L.], v. 47, n. 5, p. 953-964, jun. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16290:2013: Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment**. Geneva: ISO, 2013. 12 p.

LAVOIE, Joao Ricardo; DAIM, Tugrul Unsal. Technology Readiness Levels Improving R&D Management: a grounded theory analysis. **Proceedings of PICMETt '17: Technology Management for Interconnected World Technology**, Portland, v. 5, n. 1, p. 1-9, out. 2017.

LINCOLN, Yvonna; GUBA, Egon. **Naturalistic inquiry**. Beverly Hills: Sage, 1985.

LOPES, Pedro Faria et al. A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indicadores e ferramentas. **Actas do Congresso Nacional de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas, Lisboa**, v. 5, n. 8, p. 1-7, out. 2012.

MANKINS, J. C. **Technology readiness levels: A white paper**. 1995. Office of Space Access And Technology NASA. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/247705707_Technology_Readiness_Level__A_White_Paper. Acesso em: 11 fev. 2021.

MEC. **Escola de Gestores da Educação Básica**: Ministério da Educação. 2007. Disponível em: <http://moodle3.mec.gov.br/ufms/file.php/1/gestores/vivencial/pdf/projetointervencao.pdf>. Acesso em: 09 out. 2020.

MELLO, Carlos Henrique Pereira et al. Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução. **Production**, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 1-13, 8 nov. 2011.

MENELAU, Sueli *et al.* Realizar pesquisa sem ação ou pesquisa-ação na área de Administração? Uma reflexão metodológica. **Revista de Administração**, v. 50, n. 1, p. 40-55, Jan./Fev.

NASA. **Systems Engineering Handbook**. Disponível em: <http://www.acq.osd.mil/se/docs/NASA-SP-2007-6105-Rev-1-Final-31Dec2007.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2020.

NOLTE, W. **Readiness Level Proliferation**. AFRL/XPQ. Dtic. mil. EUA, 2011. Disponível em: http://www.dtic.mil/ndia/2011system/13132_Nolte_Wednesday.pdf. Acesso em: 31 ago. 2020.

OLECHOWSKI, Alison L. et al. Technology Readiness Levels at 40: a study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities. *Ssrn Electronic Journal*, [S.L.], v. 1, n. 3, p. 2084-2094, jan. 2015.

OLIVEIRA, Oderlene Vieira de; ZABA, Elisangela Freires; FORTE, Sérgio Henrique Arruda Cavalcante. Razão da não utilização de incentivos fiscais à inovação tecnológica da Lei do Bem por empresas Brasileiras. **Revista Contemporânea de Contabilidade**, [S.L.], v. 14, n. 31, p. 67, 3 abr. 2017.

PETRESCU, Tudor-Cristian *et al.* Developing a TRL-oriented roadmap for the adoption of biocomposite materials in the construction industry. **Frontiers of Engineering Management**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 1-14, 13 mar. 2021.

PETROVIC, Slobodan; HOSSAIN, Eklas. Development of a Novel Technological Readiness Assessment Tool for Fuel Cell Technology. **Ieee Access**, [S.L.], v. 8, p. 132237-132252, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

RIBEIRO, Núbia. **Coleção PROFNIT**: Série Prospecção Tecnológica. 1. ed. Salvador: Editora IFBA, 2019.

RIORDAN, James *et al.* Interdisciplinary Methodology to Extend Technology Readiness Levels in SONAR Simulation from Laboratory Validation to Hydrography Demonstrator. **Journal of Marine Science and Engineering**, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 159, 23 mai. 2019.

ROCHA, Daiane *et al.* Uma adaptação da metodologia TRL. **Revista Gestão em Engenharia**, São José dos Campos, v. 4, p. 45-56, jun. 2017.

SUZIANTI, Amalia *et al.* Technology readiness level assessment of lithium battery in Indonesia for national electric vehicle program. **Recent Progress On: MECHANICAL, Infrastructure And Industrial Engineering**, [S.L.], v. 3, n. 5, p. 1-9, 2020.

TAN, Weiping *et al.* A probabilistic approach to system maturity assessment. **Systems Engineering**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 279-293, 7 out. 2010.

THIOLLENT, M. **Metodologia da Pesquisa-ação**. 14. ed. São Paulo: Editora Cortez, 2005.

VANTI, N. A. P. **Da bibliometria à webometria**: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento. *Ciência da Informação*, v. 31, n. 2, p. 152-162, 2002.

XAVIER JUNIOR, Ademir *et al.* AEB Online Calculator for Assessing Technology Maturity: Imatec. **Journal of Aerospace Technology And Management**, [S.L.], v. 1, n. 12, p. 1-17, 4 abr. 2020.

APÊNDICE I – Produção Técnica Tecnológica GUIA TRL adaptado ao ciclo de vida de desenvolvimento de produto

Guia de aplicação TRL-Sense							
O objetivo desta produção técnica tecnológica é que esta ferramenta seja utilizada para auxílio do cômputo do TRL.							
OBS: Reaplicar o guia para cada componente, montagem, subsistema e sistema e alimentar a ferramenta IMATEC							
Ferramenta no link:		http://imatec.aeb.gov.br/#/main		DOCUMENTO PRELIMINAR			
Envolvidos:		SAB, RBR, AP.					
Data:		11/02/2022					
Previsão próxima avaliação:							
Projeto:		AD:	Versão: REV 0				
Subsistema:		Projeto Eletrônico					
Montagem:		Projeto PCI					
Componente:							
Nível de prontidão tecnológica	Etapa do desenvolvimento	Questões (todos devem responder)	Atingido?	Justificativa	Pendências		
TRL 1	Disponibilização dos dados de entrada e reunião de <i>Kick-Off</i>	(1.1) A fase cognitiva da criação foi concluída?					
TRL 2	Idealização pré-prótipo	(2.1) A fase cognitiva da investigação científica (equacionamento de ideias) foi concluída?					
TRL 3	Execução pré-prótipo	(3.1) Ensaio funcionais e simulações foram concluídos? (3.2) Medidas científicas orientadoras foram identificadas? (3.3) Uma prova de conceito de função crítica foi finalizada de forma analítica ou experimental?					
TRL 4	Protótipo -Bancada	(4.1) Foi realizada investigação experimental em laboratório?					
		(4.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho da componente foi derivada a partir de requisitos de medidas científicas?					
		(4.3) Testes de laboratório mostraram que modelo de desenvolvimento cumprem os parâmetros funcionais críticos e de desempenho?					
TRL 5	Protótipo - LIT	(5.1) Foram realizadas investigações experimentais em ambiente relevante (espaço simulado)?					
		(5.2) Os parâmetros funcionais críticos e de desempenho das componentes foram validados no ambiente relevante?					
TRL 6	Protótipo – LIT testes completos	(6.1) O componente foi demonstrado em ambiente relevante (espaço simulado)?					
TRL 7	Teste Cliente - Protótipo	(7.1) O protótipo foi demonstrado em ambiente operacional?					
TRL 8	Teste Cliente - Piloto	(8.1) O componente foi qualificado em testes e demonstrações em ambiente operacional?					
TRL 9	Validação	(9.1) O componente encontra-se em operação ou foi operado com sucesso?					

APÊNDICE II – Artigo publicado



XXIV Seminários em Administração

Certificado de Apresentação de Trabalho

*Certificamos para os devidos fins, que o artigo aplicado intitulado **Technology Readiness Levels (TRL) Aplicada à Análise do Nível de Maturidade Tecnológica de Projetos: Uma Revisão Sistemática e Bibliográfica de Literatura** foi apresentado no **XXIV SEMEAD - Seminários em Administração** realizado pela Universidade de São Paulo, dias 10, 11 e 12 de novembro .*

Autores:
 Reinaldo Borsato Rodrigues(*)
 Sandra Miranda Neves
 Andréa Aparecida da Costa Mineiro
 Isabel Cristina da Silva Arantes

(*) *Realizou a apresentação do trabalho*



Prof. Dr. João Maurício Gama Boaventura
 Coord. Geral XXIV SemeAd

Participação



Convênios



Patrocínio



Apoio

