

Modelo de análise de prontidão para inovação para empresas nascentes

Analysis model of innovation readiness for nascent companies

DOI:10.34117/bjdv8n5-516

Recebimento dos originais: 21/03/2022

Aceitação para publicação: 29/04/2022

Eduardo Amadeu Dutra Moresi

Doutor em Ciência da Informação

Instituição: Universidade Católica de Brasília

Endereço: QS 07, Lote 01, EPCT, Brasília - DF

E-mail: moresi@p.ucb.br

Mário de Oliveira Braga Filho

Doutorando em Educação

Instituição: Universidade Católica de Brasília

Endereço: QS 07, Lote 01, EPCT, Brasília - DF

E-mail: braga@p.ucb.br

Jair Alves Barbosa

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Católica de Brasília

Endereço: QS 07, Lote 01, EPCT, Brasília - DF

E-mail: jairab@yahoo.com.br

RESUMO

As empresas nascentes, do tipo Startups, são criadas para entregar um novo produto ou serviço sobre condições de extrema incerteza, com um modelo de negócios a ser validado e executado com eficiência. Contudo, precisam validar a concepção do produto ou serviço, levantar investimentos e gerar receita pela comercialização em um mercado desconhecido. Então, como uma empresa nascente poderá avaliar se o seu produto ou serviço está pronto para o mercado? Como os gestores de uma Startup podem se comunicar com investidores sobre o estado atual do desenvolvimento tecnológico do produto ou serviço? Este artigo analisa o emprego de instrumentos de medida de níveis de prontidão tecnológica que auxiliem empresas nascentes, do tipo Startups, a avaliar o estado atual do desenvolvimento de sua solução tecnológica e outros aspectos pertinentes ao seu modelo de negócios. A avaliação dos níveis é verificada por meio de evidências qualitativas e documentais.

Palavras-chave: níveis de prontidão tecnológica, níveis de prontidão de inovação, níveis de prontidão científica, startups.

ABSTRACT

Nascent Startups companies are created to deliver a new product or service on conditions of extreme uncertainty, with a business model being validated and executed efficiently. However, they need to validate the design of the product or service, raise investments and generate revenue from marketing in an unknown market. So how can a nascent company

assess whether its product or service is ready for the market? How can the managers of a startup communicate with investors about the current state of technological development of the product or service? This paper analyzes the use of technology readiness level measurement tools that help nascent startups assess the current state of development of their technology solution and other aspects pertinent to their business model. The assessment of levels is verified by qualitative and documentary evidence.

Keywords: technology readiness levels, innovation readiness levels, scientific readiness levels, startups.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as Universidades brasileiras incentivam o empreendedorismo e a inovação em seus projetos pedagógicos. Algumas possuem Incubadoras de Empresas e/ou Parques Tecnológicos o que estimula a criação de empresas Startups. Contudo, o processo de criação de uma Startup envolve incertezas e ambiguidades devido à falta de conhecimento sobre o mercado, à imaturidade dos estudantes, à fragilidade do modelo de negócios, entre outros fatores.

Vários desafios se apresentam na fase nascente de uma Startup tais como a formação de uma equipe multidisciplinar, a elaboração da proposta de valor do novo negócio, a orientação do desenvolvimento dos produtos/serviços que serão comercializados e a captação de recursos financeiros. No caso das empresas de base tecnológica, esses desafios devem estar alinhados aos esforços consideráveis e focados nas operações de desenvolvimento da tecnologia caracterizada pela inovação (CÔRTEZ et al, 2005).

Startup é uma organização formada para pesquisar um modelo de negócio que possa ser repetido e escalável. Desta forma, para ter uma ideia de estabilidade é necessário estimar se para o crescimento do negócio será indispensável um aumento de capital e/ou pessoal na mesma proporção (BLANK, 2006).

Ries (2012) também define uma Startup como uma instituição humana criada para entregar um novo produto ou serviço sobre condições de extrema incerteza, algo que se pode reproduzir repetidamente em grande quantidade com grande ganho de produtividade, também conhecido como produção em massa. Para tanto, foi criado um conceito de Startup Enxuta (*Lean Startup*) onde o objetivo desse tipo de companhia consiste em validar um modelo de negócios e não o executar com eficiência. Ou seja, o negócio compreende um conjunto de hipóteses que necessitam ser validadas ou

repudiadas rapidamente, em ciclos curtos que geram produtos entregáveis que validam o negócio e o seu suposto mercado de consumo.

Trata-se de um modelo de empresa nascente, em fase de construção de seus projetos, que está vinculada fortemente à pesquisa, à investigação e ao desenvolvimento de ideias inovadoras, no qual se encontra um grupo de pessoas à procura de um modelo de negócios repetível e escalável, trabalhando em condições de extrema incerteza. Uma Startup possui um número ilimitado de metas, sendo que algumas se destacam por focar pontos de referência da empresa delimitando um progresso importante ao longo de sua estrada para o sucesso (KAWASAKI, 2011). Entre essas metas, há sete pontos nos quais toda empresa deve se concentrar: comprovar a concepção da ideia; gerar especificações completas de projeto; concluir um protótipo; levantar capital; levar aos consumidores uma versão que possa ser testada; levar aos consumidores uma versão final; equilibrar receita e despesa.

Considerando o papel fundamental do empreendedor na atividade de planejamento, desenvolver estratégias que possibilitem reduzir incertezas sobre o desenvolvimento da tecnologia, análise de mercado, ações de comunicação, estrutura organizacional, entre outros aspectos, envolve um exercício de imaginar e, em algum nível, estruturar conhecimento sobre aspectos futuros do negócio não postos em prática em um ambiente que ainda não considera a empresa como participante. Assim, instrumentos, que possibilitem identificar ações a serem implementadas, poderão ser úteis no desenvolvimento de empresas nascentes.

Então, como uma empresa nascente poderá avaliar se o seu produto ou serviço está pronto para o mercado? Como os gestores de uma Startup podem se comunicar com investidores sobre o estado atual do desenvolvimento tecnológico do produto ou serviço? Isso justifica a adoção de meios que apoiem o planejamento desses novos negócios por meio de atividades seletivas e específicas pertinentes ao contexto atual e que conduzam à situação futura desejada.

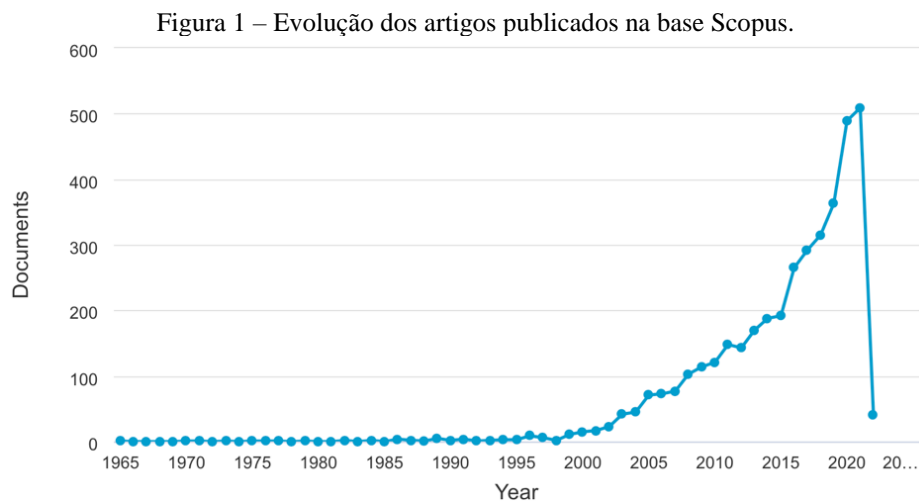
Este trabalho analisa o emprego de instrumentos de medida de níveis de prontidão tecnológica que auxiliem empresas nascentes, do tipo Startups, a avaliar o estado atual do desenvolvimento de sua solução tecnológica e outros aspectos pertinentes ao seu modelo de negócios. No momento, esta pesquisa já analisou a literatura relacionada aos termos *readiness level* e *readiness assessment*, cuja síntese é apresentada no item 2, e apresenta instrumentos de medida de prontidão em que o atendimento a cada nível se baseia em

evidências qualitativas tais como documentos, código fonte de aplicações, imagens de telas de navegação, etc.

2 SÍNTESE DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica, realizada na base Scopus, se baseou em uma expressão de busca bem abrangente: “*readiness level*” OR “*readiness assessment*”. O resultado foi a recuperação de 3883 publicações, do período entre 1965 e 2022 e no idioma inglês, cuja evolução é apresentada na Figura 1. Pode-se observar que houve um aumento no número de publicações nos últimos anos, sendo que o pico ocorreu em 2021.

O mapeamento científico procura encontrar representações das conexões intelectuais dentro do sistema dinâmico do conhecimento científico, investigando-o de um ponto de vista estatístico (SMALL, 1997). Especificamente, analisa a estrutura conceitual, que representa as relações entre as palavras de um conjunto de publicações através de uma rede de coocorrência de palavras-chave. O objetivo é aprofundar a compreensão das descobertas científicas em torno de temas e tópicos principais dentro das fronteiras da pesquisa como uma aprendizagem ativa.



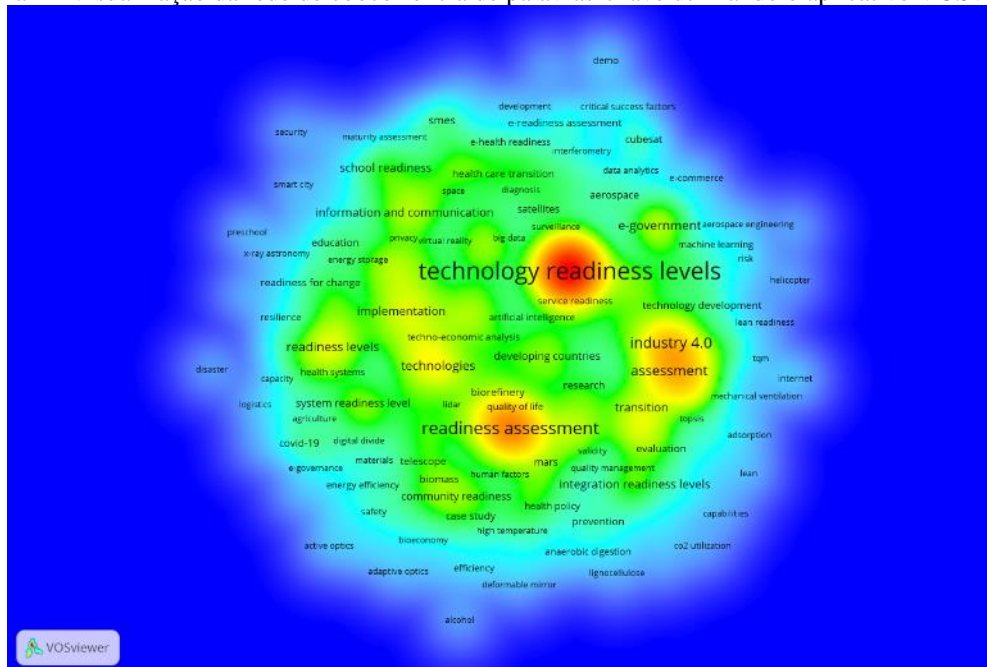
A fim de realizar a análise da estrutura conceitual do tema pesquisado, foi gerada uma rede de coocorrência de palavras-chave dos autores usando o software VOSviewer (VAN ECK, WALTMAN, 2010, 2021). Para gerar a rede foi selecionada a ocorrência de cada palavra-chave de pelo menos 4 vezes, resultando um grafo com 334 nós, 7 comunidades e 1488 arestas. Cada comunidade possui pelo menos 30 nós. Algumas palavras-chave se destacam: *technology readiness levels*, *readiness assessment*, *industry*

4.0, *assessment*, *readiness levels*, entre outras. A Figura 2 apresenta uma visualização da rede de coocorrência de palavras-chave dos autores.

A palavra-chave *technology readiness levels* (TRL) teve origem em diversos estudos realizados nos Departamentos de Defesa dos Estados Unidos da América (EUA), do Reino Unido, do Canadá e da Austrália. Na área aeroespacial, a NASA foi pioneira na obrigatoriedade de tal mensuração em seus projetos, o que foi seguido por outras agências espaciais (LARGENT, 2003).

Segundo o Plano Tecnológico da NASA (2000), tecnologia é definida como a aplicação prática do conhecimento para criar a capacidade de fazer algo novo de forma inteiramente nova. Diferentemente da pesquisa científica que engloba um novo conhecimento do qual a tecnologia é derivada para resolver problemas técnicos específicos. Nesse sentido, a avaliação de tecnologias é necessária para evitar o comprometimento da aplicação e do orçamento, devendo ser feita iterativamente até que os requisitos e os recursos estejam alinhados e dentro de um risco aceitável. Essa avaliação pode assim construir uma componente de gestão do risco e da avaliação técnica global.

Figura 2 - Visualização da rede de coocorrência de palavras-chave utilizando o aplicativo VOSviewer.



O desenvolvimento de novas capacidades tecnológicas normalmente depende do sucesso de esforços de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), particularmente para tecnologias avançadas. Inevitavelmente, quaisquer projetos dessa natureza

enfrentam três principais desafios: desempenho, cronograma e orçamento. Quando bem executados, os programas de desenvolvimento de tecnologias avançadas podem reduzir substancialmente a incerteza em todas essas três dimensões de gerenciamento de projetos. Caso contrário, os novos desenvolvimentos sofrem com excessos de custos, atrasos nos cronogramas e constantes modificações dos objetivos iniciais de desempenho. O desafio está na capacidade de fazer avaliações claras e bem documentadas sobre a prontidão e os riscos da tecnologia, e fazê-lo em pontos-chave do ciclo de vida do programa.

Como resultado desse esforço, alguns diferentes conceitos e sistemas foram criados com a finalidade de mensurar a prontidão sistêmica, funcional ou tecnológica de equipamentos/sistemas, especialmente daqueles desenvolvidos para aplicações militares e espaciais. Podem-se citar os seguintes modelos: Technology Readiness Levels (TRL), Interface Maturity Levels (IML), System Readiness Levels (SRL), Integration Readiness Levels (IRL), Design Maturity Levels (DML), Manufacturing Readiness Levels (MRL), Programmatic Readiness Levels (PRL) e Technology Maturity Level (TML), além de processos e ferramentas associadas ao conceito em estudo (CANADA, 2006, p. 1-2; LARGENT, 2003).

Os artigos mais citados trataram de pesquisas e aplicações no monitoramento das condições estruturais de aeronaves (DI SANTE, 2015), de uma breve revisão das microestruturas e propriedades mecânicas de ligas metálicas (GORSSE et al, 2017), do estado da arte de satélites e aeronaves para a detecção remota de derramamento de óleo marinho (LEIFER et al 2012), do TRL dos diferentes elementos da tecnologia de veículos elétricos a bateria e destacou as áreas tecnológicas onde são esperados importantes progressos (ANDWARI et al, 2017), do conceito de avaliações de prontidão tecnológica e forneceu uma retrospectiva sobre a história dos TRLs (MANKINS, 2009), da análise crítica dos modelos de maturidade de manufatura inteligente e indústria 4.0 (MITTAL et al, 2018).

Mais recentemente, Kaur e Singh (2022) apresentaram o projeto e o desenvolvimento de um medidor econômico para redes trifásicas com TRL 9. Soares e Wang (2022) desenvolveram um estudo para rever criticamente o desenvolvimento tecnológico para a carga de veículos elétricos nas estradas e fornecer novas perspectivas sobre a infraestrutura viária eletrificada para a transferência de energia sem fio para estes veículos. Okolie et al (2022) revisaram a integração de processos de conversão termoquímica e biológica para ajudar os pesquisadores e formuladores de políticas a identificar as lacunas de conhecimento sobre o tema. Abdelshafy e Walther (2022)

analisaram o potencial de acoplamento da captura e utilização de carbono com as cadeias de abastecimento da indústria da construção civil. Terzis (2022) apresenta e analisa métricas de inovação em construção e engenharia civil.

Nos itens a seguir serão detalhados os níveis de prontidão para tecnologias, inovação e projetos de pesquisa científica.

3 NÍVEIS DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA (*TECHNOLGY READINESS LEVELS – TRL*)

A escala de prontidão tecnológica Technology Readiness Level (TRL) foi desenvolvida com o intuito de prover uma medida relativa ao estado de uma nova tecnologia em relação ao seu uso para futuros sistemas espaciais. A Figura 3 apresenta um diagrama da escala TRL.

Consolidou-se como uma métrica de uso mundial importante não apenas para avaliar a prontidão tecnológica, mas como um método para analisar riscos inerentes ao processo de desenvolvimento tecnológico e fornecer bases para a tomada de decisão e orientações para gestores voltados à Pesquisa e Desenvolvimento (ALTUNOK, CAKMAK, 2010; MANKINS, 1995; MANKINS, 2009).

A escala TRL foi inicialmente concebida em 1974 por Stan Sadin, pesquisador da NASA (2010). Em 1989, a escala foi formalizada, ainda com sete níveis de prontidão (SADIN, POVINELLI, ROSEN, 1989) e em 1995 foi reforçada com mais dois níveis, em um espectro de um a nove, conforme ilustra a Figura 4 (MANKINS, 1995; MANKINS, 2009).

Figura 3 – Esquema de níveis de prontidão do TRL (NASA, 2000).



O Quadro 1 apresenta a definição e a descrição dos níveis de prontidão tecnológica (USA, 2013, p. 9). Estes níveis de desenvolvimento tecnológico constituem uma ferramenta estratégica de gestão de projetos ao permitirem a identificação da fase de prontidão atingida, permitindo aos investigadores e à gestão superior supervisionar a sua evolução, programar o trabalho a ser desenvolvido e a respetiva orçamentação. A avaliação de cada nível se baseia em evidências documentais que comprovam que as exigências foram atingidas.

Alguns órgãos desenvolveram métodos para calcularem o TRL de um equipamento ou sistema. Os níveis 1, 2 e 3 se referem ao conceito da nova tecnologia. Os níveis 4, 5 e 6 avaliam o desenvolvimento de componentes, enquanto os níveis 7, 8 e 9 verificam se a tecnologia está completa (NASA, 2010). Em relação a Pesquisa e Desenvolvimento, os 9 níveis de TRL da NASA possuem os seguintes agrupamentos: pesquisa da tecnologia básica: TRL1 e TRL2; pesquisa para a comprovação da viabilidade e da praticidade da tecnologia: TRL2, TRL3 e TRL4; desenvolvimento da tecnologia: TRL3, TRL4, TRL5 e TRL6; demonstração da aplicabilidade da tecnologia: TRL5, TRL6 e TRL7; desenvolvimento dos subsistemas e sistemas com a aplicação da tecnologia: TRL6, TRL7 e TRL 8; testes de sistemas, operações e uso em lançamentos de naves: TRL8 e TRL9.

Quadro 1. Definição e descrição dos Níveis de Prontidão de Tecnológica (TRL) (USA, 2013, p. 9).

TRL	Definição	Descrição
9	Sistema atual operado em toda a gama de condições esperadas.	Operação real da tecnologia em sua forma final, em toda a gama de condições de operação.
8	Sistema real concluído e qualificado através de teste e demonstração.	A tecnologia tem sido comprovada para trabalhar na sua forma final e em condições esperadas. Em quase todos os casos, este TRL representa o fim do verdadeiro desenvolvimento do sistema.
7	Um sistema semelhante (protótipo) de grande escala, demonstrado num ambiente relevante	Protótipo do sistema de escala completa. Representa um grande passo acima do TRL 6, exigindo a demonstração de um protótipo do sistema em um ambiente relevante. Um protótipo é definido como um modelo físico ou virtual usado para avaliar a viabilidade técnica ou utilidade de uma determinada tecnologia ou processo, conceito ou sistema.
6	Validação de sistema similar (protótipo) num ambiente relevante	O sistema em escala representativa, que está bem além da escala testada para TRL 5, é testado em um ambiente relevante. Representa um passo importante na prontidão demonstrada e na integração de sistemas.
5	Escala de laboratório/ bancada, validação de sistema semelhante em ambiente relevante	Os componentes tecnológicos básicos estão integrados de modo que a configuração do sistema é semelhante à aplicação final em quase todos os aspectos.
4	Validação de componentes e/ou sistemas em ambiente laboratorial	Componentes tecnológicos básicos são integrados para estabelecer que as peças vão trabalhar em conjunto. Isto é relativamente "baixa fidelidade" em comparação com o sistema eventual. Inclui a integração de hardware "ad hoc" em laboratório e testes com uma variedade de simuladores. Os testes em laboratório/escala de bancada podem não ser apropriados para todos os sistemas. Por exemplo, sistemas mecânicos, tais como tecnologias de recuperação robótica, podem exigir testes de protótipo em escala completa para atender a TRL 4.
3	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característica	Inicia-se a pesquisa e o desenvolvimento ativo. Isto inclui estudos analíticos e estudos de escala de laboratório/bancada para validar fisicamente as previsões analíticas de elementos separados da tecnologia. Exemplos incluem componentes que ainda não estão integrados ou representativos. Os componentes podem ser testados com simuladores.
2	Conceito de tecnologia e/ou aplicação formulada	Início da invenção. Uma vez que os princípios básicos são observados, as aplicações práticas podem ser inventadas. As aplicações são especulativas e não pode haver nenhuma prova ou análise detalhada para apoiar as suposições. Os exemplos ainda estão limitados a estudos analíticos.
1	Princípios básicos observados e relatados	Nível mais baixo de prontidão tecnológica. A investigação científica começa a se traduzir em Pesquisa e desenvolvimento aplicados (P&D). Exemplos podem incluir estudos em papel das propriedades básicas de uma tecnologia.

O TRL tem como objetivo tornar a avaliação e comunicação do nível de prontidão em novas tecnologias mais efetiva e facilitar o entendimento dos stakeholders e colaboradores envolvidos em desenvolvimento de projetos da NASA. Ainda, provê um índice de avaliação de prontidão que pode ser comparado entre diferentes tecnologias. Entre as vantagens do TRLs, pode-se mencionar (NASA, 2010): fornecer uma compreensão comum do status em que se encontra o desenvolvimento da tecnologia; a gestão de riscos tem relação direta com o status da tecnologia, uma vez que não são ainda conhecidos todos os potenciais de falhas, propagações e repercussões de suas anomalias; o TRL é usado para se tomar decisões de financiamento do desenvolvimento da tecnologia, em função do seu status; o TRL também é usado para se tomar decisões sobre a transição da tecnologia entre seus níveis possíveis de aprontamento.

A Petrobras financia muitas universidades e instituições de P&D e realiza projetos internos com alto nível de inovação. O desafio dos gestores é o tamanho da carteira com mais de 800 projetos, em diferentes níveis de maturidade. Para apoiar a gestão tecnológica, é empregada a metodologia de avaliação de preparação tecnológica (*Technology Readiness Assessment - TRA*), tendo como referência o guia TRA G 413.3-4 do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (USA, 2009).

Leite et al (2015) apresentam um estudo em que foram selecionados quatro projetos financiados pela empresa, com níveis de prontidão distintos e considerando as diferentes culturas empresariais dentro das áreas envolvidas, para serem utilizados como projetos-piloto para o desenvolvimento da metodologia TRA da Petrobras. O processo de avaliação foi realizado em um período de um ano, tendo como referência a metodologia original do DoE. O resultado foi a proposta da Metodologia TRA da Petrobras, que compreende duas versões da planilha Calculadora de Nível de Prontidão Tecnológica: uma versão completa para os projetos mais críticos, estratégicos e com o comprometimento de maior volume de recursos, e uma versão simplificada para avaliar os projetos regulares.

A escala de Nível de Prontidão Tecnológica (TRL) é uma das técnicas de avaliação de maturidade mais utilizadas pelas empresas industriais em todo o mundo. No entanto, não é uma panaceia que irá trabalhar para cada empresa ou cada indústria em sua forma original. Conseqüentemente, para que a escala seja verdadeiramente útil, ela tem de ser adaptada às características únicas de diferentes empresas e indústrias. Klar et al (2016) propõem uma escala revisada e específica de TRL para avaliar a maturidade tecnológica nas indústrias siderúrgicas. Esta escala TRL revisada ajuda os gestores a

avaliar a maturidade da tecnologia e reduzir o risco, proporcionando melhores avaliações de projetos e tecnologias, além de fornecer uma linguagem comum.

Carmack et al (2017) apresentam a definição de níveis de prontidão tecnológica (TRLs) para a tecnologia de combustível nuclear. Eles ilustram a definição proposta com exemplos selecionados sobre os métodos de TRLS usados atualmente para avaliar a maturidade de combustíveis nucleares e materiais em desenvolvimento pelo DoE.

O conceito de colaboração industrial humano-robô (*human-robot collaboration - HRC*) está se tornando cada vez mais atraente como um meio para aumentar a produtividade e a manufatura de produtos. Charalambous, Fletcher e Webb (2017) analisaram estudos anteriores e estabeleceram o vínculo dos principais fatores humanos a um sistema de nível de prontidão de maturidade industrial, visando desenvolver uma nova ferramenta de nível de prontidão de fatores humanos (*Human Factors Readiness Level - HFRL*) para apoiar profissionais de design de sistemas na implementação da HRC industrial com maior possibilidade de sucesso.

Portanto, esta pesquisa evidencia que, apesar do conceito de TRL ter origem nas áreas de defesa e aeroespacial, vários estudos foram produzidos no sentido de mostrar a sua aplicação em diversos domínios do desenvolvimento tecnológico.

A escala TRL foi normalizada pela ISO 16290:2013 (ISO, 2015), sendo desenvolvida por meio da análise de documentos relacionados à aplicação do TRL pela NASA, Departamento de Defesa dos Estados Unidos e instituições da Agência Espacial Europeia.

4 NÍVEIS DE PRONTIDÃO DE INOVAÇÃO (*INNOVATION READINESS LEVELS – IRL*)

O termo inovação se refere à criação e à aplicação de uma nova ideia para criar valor em um determinado contexto. Algumas dessas ideias e aplicações de criação de valor podem se traduzir em mudanças incrementais como a introdução de recursos adicionais em um produto de consumo, enquanto outras podem levar a mudanças radicais ou mesmo revolucionárias - como o lançamento dos computadores pessoais ou do iPod.

Autores sobre inovação, como Schumpeter (1934), tipicamente distinguem entre invenção, uma ideia manifestada, e inovação, ideias aplicadas com sucesso na prática. O objetivo final da inovação é a mudança positiva, para tornar alguém ou algo melhor. A inovação que leva ao aumento da produtividade é a fonte fundamental de aumento da riqueza em uma economia. O trabalho de Schumpeter (1934) influenciou bastante as

teorias da inovação. Seu argumento é de que o desenvolvimento econômico é conduzido pela inovação por meio de um processo dinâmico em que as novas tecnologias substituem as antigas, um processo por ele denominado “destruição criadora”. Ele distingue entre invenção, uma ideia manifestada; inovações radicais, que engendram rupturas mais intensas; e inovações incrementais, que dão continuidade ao processo de mudança.

Schumpeter propôs uma lista de cinco tipos de inovação: introdução de novos produtos; introdução de novos métodos de produção; abertura de novos mercados; desenvolvimento de novas fontes provedoras de matérias-primas e outros insumos; criação de novas estruturas de mercado em uma indústria.

Contudo, gerenciar a inovação em estágio inicial é um desafio. As decisões de alocação de recursos devem ser feitas com base em dados escassos e carregados de incerteza. A decisão de coletar mais dados é, em si, uma alternativa de alocação de recursos. Decidir pedir mais informações sobre todas as ideias é equivalente a decidir investir em todas as ideias, que é uma estratégia de eficácia duvidosa. O artifício é utilizar um conjunto limitado de perguntas que forneça os subsídios necessários para a tomada de decisões sobre investimentos, com maior expectativa de assertividade.

Conforme evidenciado no referencial teórico acima, as pesquisas existentes sobre TRL ignoram o papel da gestão da inovação. Para ajudar a preencher essa lacuna de conhecimento, Lee, Chang e Chien (2011) desenvolveram um modelo explícito que pode ser usado como uma ferramenta para gerenciar processos de inovação (TAO, PROBERT, PHAAL, 2010; TAO, 2010), que é sintetizado no Quadro 2.

O framework proposto, que separa o ciclo de vida da inovação em seis fases (níveis de prontidão) e aborda a gestão do seu processo, considera os cinco aspectos-chave: tecnologia - é o processo pelo qual os seres humanos modificam a natureza para satisfazer as suas necessidades e desejos; mercado - tem como principal responsabilidade estratégica a relação cliente-fornecedor; organização - fornece uma medida sistemática e consistente da prontidão da organização de uma empresa que é necessária para desenvolver uma tecnologia para o respectivo nível de prontidão tecnológica; parceria - é um tipo de entidade empresarial em que os parceiros partilham uns com os outros os lucros ou as perdas da empresa; risco - as formas de avaliar os riscos devem figurar na lista das técnicas de gestão dos projetos de inovação (GOFFIN, MITCHELL, 2005).

As fases de IRL foram assim definidas (DOYLE, 2002):

- conceito: os princípios científicos básicos da inovação foram observados e relatados, e as funções e/ou características críticas foram confirmadas através de experiências

(equivalente a TRL 1-3);

- componentes: os componentes foram desenvolvidos e validados e um protótipo foi obtido para demonstrar a tecnologia (equivalente a TRL 4-6);

- conclusão: o desenvolvimento tecnológico foi concluído e a funcionalidade completa do sistema comprovada no campo (equivalente a TRL 7-9);

- abismo: no quadro IRL, abismo se refere aos desafios e às dificuldades que a inovação pode encontrar quando introduzida pela primeira vez no mercado (fase inicial). O termo é mais amplo do que a definição de Moore (1999): o abismo entre os primeiros adeptos da alta tecnologia e o produto (os entusiastas e visionários) e a maioria inicial (os pragmáticos);

- concorrência: é a fase madura do mercado, quando atinge um estado de equilíbrio marcado pela ausência de crescimento significativo ou inovação (MOORE, 1999). A principal missão nesta fase é manter e reforçar a posição da inovação e lidar com a concorrência;

- mudança/encerramento: estas são as duas opções na fase de declínio do mercado.

Mudança se refere a um novo ciclo de inovação da tecnologia, inaugurando novos mercados, transformando o modelo de negócios e reinventando a corporação, a fim de buscar e desenvolver vantagem competitiva. Por outro lado, encerramento significa que a inovação veio à obsolescência e deve ser encerrada.

Em outra abordagem, Evans e Johnson (2013) apresentam uma ampliação do conceito de TRL, oferecendo uma alternativa para avaliar as capacidades de uma organização em relação a um modelo de negócios específico. Eles sugerem que o IRL proposto pode ser aplicado nas diversas áreas funcionais de uma organização tais como Finanças, Recursos Humanos, Operação e assim por diante.

O resultado de todas as áreas avaliadas pode ser representado em um diagrama do tipo radar, em que um pequeno círculo no centro indicaria que um trabalho de desenvolvimento significativo é necessário. À medida que a ideia for sendo amadurecida, os IRLs irão aumentar e o círculo crescerá até que o modelo de negócios seja totalmente implementado e o diagrama totalmente preenchido.

O Quadro 3 apresenta a interpretação dos nove níveis do TRL para a prontidão de inovação. É importante notar que os IRLs se destinam a medir o grau de alcance das capacidades necessárias para que uma empresa ou uma área funcional possa passar de seu modelo de negócios atual para uma nova situação que foi planejada ou prevista.

Quadro 2 – Níveis de Prontidão de Inovação (TAO, PROBERT, PHAAL, 2009: 28).

	Desenvolvimento Tecnológico			Evolução de mercado		
	IRL 1 - Conceitos	IRL 2 - Componentes	IRL 3 – Conclusão	IRL 4 - Abismo	IRL 5 – Concorrência	IRL 6 - Mudança /encerramento
Tecnologia	Princípios científicos básicos observados e reportados; viabilidade tecnológica confirmada; para inovação radical: determinar se a inovação é radical, identificar a vantagem única, identificação progressiva dos objetivos técnicos	Componentes individuais testados; protótipos demonstrados; capital intelectual protegido	Sistema atual demonstrado; capital intelectual protegido; testes externos concluídos; produto/tecnologia documentado; teste de conformidade aderente às normas	Identificados os principais benefícios dos testes; planejados o suporte e o incentivo para a adoção de sua tecnologia pelo mercado; expertise alcançada; disponibilidade geral para todo o mercado; suporte pós-venda	Oferta de suporte de manutenção; identificadas as oportunidades para desenvolver novas tecnologias; atividades de P&D menos intensas; fornecimento de serviço tecnológico	Desenvolvidas novas inovações; negócios gerenciados; definida a estratégia de saída
Mercado	Clientes e parceiros comerciais identificados; pesquisa de mercado em andamento; oportunidades identificadas e desenvolvidas; trabalhando com clientes líderes; identificadas as necessidades e demandas dos clientes Para inovação radical: Localizado o mercado inicial	A rota inicial para o mercado definida; estratégia de marketing desenvolvida; consumidor final identificado; plano de lançamento no mercado detalhado e definido	Engajamento no mercado usando produtos comerciais; feedback de mercado sobre tamanho e penetração; preços e lançamentos aprovados; conhecidos os requisitos dos consumidores e suas necessidades específicas; segmentação, tamanho e Market share estimados	Internacionalizar o produto através de parcerias; posicionamento no mercado; modelo de negócios planejado; feedback de consumidores potenciais; competidores identificados; use a parceria para entrar no mercado	Produtos diferenciados; produto internacionalizado; expansão dos produtos para novos setores de tecnologia; prover serviços e soluções; revisão periódica; modelo de negócio refinado; use a parceria para competir	Revisada a demanda do mercado; identificadas as oportunidades para crescer nos mercados ativos, expandir em novos mercados ou sair
Organização	Configuração estratégica confirmada; escopo do projeto e das tarefas definidos; recursos e serviços necessários confirmados; estrutura informal livre (principalmente equipe de P&D); para inovação radical: definido o significado estratégico da inovação radical; canais de comunicação gratuitos	Requisitos de projeto e lista de parceiros alinhados; responsabilidades e prazos definidos; negócio analisado e plano definido; pessoas chave envolvidas	Formalização da organização; estrutura de negócios com colaboradores formalizados; identificados os requisitos adicionais de pessoal recursos humanos	Parcerias estabelecidas com organizações independentes; identificadas as oportunidades para introduzir produtos em novos parceiros e mercados	Identificadas as oportunidades para melhorar a tecnologia visando atender as necessidades do Mercado; analisados os processos técnicos e comerciais para melhorar os preços e os lucros; maior eficácia e cooperação; reestruturação implementada	Iniciado novo processo IRL; foco em atividades comerciais ou estratégia de saída
Parcerias	Identificados os potenciais parceiros de projeto	Parceiros selecionados; intenções estabelecidas	Desenvolver sondagens e notas de interesse para colaboração em etapas posteriores; parceria formalmente estabelecida	Cooperação no âmbito de uma rede dinâmica; gestão contínua	Discutir novas oportunidades com parceiros atuais ou novos; manter relações existentes; cessar a parceria; procura por parceiros acadêmicos	
Risco	Identificados os riscos tecnológicos e comerciais	Riscos tecnológicos e comerciais avaliados (solução alternativa considerada); risco organizacional considerado (Plano de investimento iniciado e investimento em andamento)	Identificação dos riscos comerciais e de requisitos de investimentos; riscos tecnológicos avaliados; riscos organizacionais avaliados (Lucro estimado; definido como será o grande investimento)	Risco organizacional periodicamente avaliado (especialmente os indicadores financeiros)	Analisar os riscos da inovação atual ou das novas inovações propostas; consideração sobre as duas opções; elaborado o plano de transição ou o de fechamento	

5 NÍVEIS DE PRONTIDÃO CIENTÍFICA (*SCIENTIFIC READINESS LEVELS – SRL*)

Os níveis de prontidão científica (SRLs) se referem a um conjunto de métricas que permitem avaliar a maturidade de uma determinada disciplina científica e a comparação consistente da maturidade entre diferentes tipos de disciplinas. Existem 9 etapas no SRL e a importância relativa de cada desafio pode ser diferente durante o processo de maturação capturado nos níveis SRL-1 a SRL-9 (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2015).

TRLs podem ser definidas para componentes de hardware e/ou software e é possível aplicar uma métrica comum com critérios rígidos de avaliação. As SRLs podem estar relacionadas a marcos objetivos durante o desenvolvimento e a implementação de uma solução. Além disso, a literatura revisada por pares fornece uma referência para desenvolvimentos científicos direta ou indiretamente relacionados com os objetivos científicos e disciplinas - independentemente do processo de implementação da solução.

A Figura 4 apresenta os nove níveis de prontidão científica.

Quadro 3 – Definição dos IRL a partir da escala de TRL (EVANS, JOHNSON, 2013: 54).

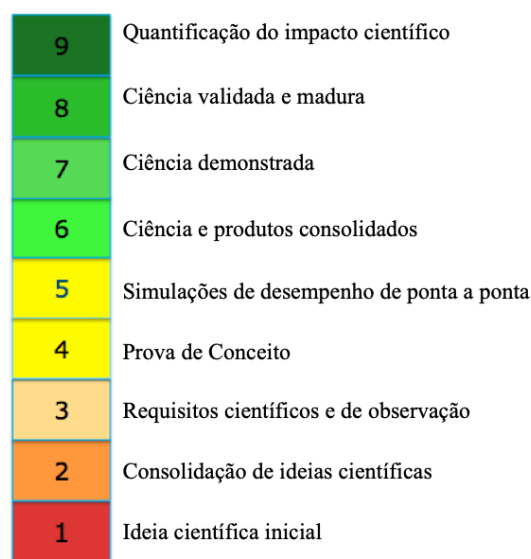
IRL	Níveis de Prontidão	Definição
1	Inventor ou equipe com um sonho	Nível mais baixo de prontidão onde a intenção é traduzir uma ideia, de uma aplicação ou de transferência de tecnologia, em um negócio de risco.
2	Estudos conceituais produzidos	Uma vez que as ideias básicas foram formuladas, elas são colocadas no papel para estudos e análises em relação às oportunidades de negócios.
3	Evidência experimental de oportunidade de negócio	Inicia-se a pesquisa e o desenvolvimento ativo, incluindo estudos analíticos/laboratoriais para validar previsões sobre o mercado, a concorrência e a tecnologia.
4	Capacidade de trabalhar com programas de escopo limitado com equipes de projeto	Componentes tecnológicos básicos e de negócios são desenvolvidos para estabelecer as condições de integração; está disponível um plano inicial de negócios.
5	Capacidade para suportar o desenvolvimento da engenharia de projeto e o design (nenhum produto, nenhuma receita)	Os componentes tecnológicos básicos e de negócios estão integrados com elementos de suporte razoavelmente realistas. O plano de negócios tem credibilidade, mas ainda precisa ser validado considerando as características do produto final.
6	Capacidade de suportar desenvolvimento e o design com uma equipe de negócios orientada pelo mercado (produto, sem receita)	Um protótipo representativo do sistema é testado em um ambiente relevante. A equipe de negócios ainda está incompleta e o empreendimento ainda não está pronto para a comercialização. Está disponível um plano completo de negócios, incluindo aspectos de mercado, operacional, tecnológico e financeiro.
7	Capacidade de suportar produção limitada; Equipe de negócios completa e contratada (produto e receitas limitadas)	O negócio pode ser executado em uma escala limitada. A equipe completa está mobilizada.
8	Capacidade de transição para a plena produção e distribuição (produtos e receitas)	A tecnologia tem sido comprovada para operar e a estrutura de risco foi homologada para ser capaz de suportar parcialmente o crescimento de mercado.
9	Negócios totalmente articulados com a infraestrutura e pessoal adequados (crescente participação de mercado)	A oferta que incorpora a nova tecnologia tem sido utilizada em condições operacionais e o negócio está funcionando com participação crescente de mercado.

Os nove níveis têm a seguinte descrição:

- 1 - **Ideia Científica Inicial:** uma ideia combinada com um objetivo científico geral é declarada e uma hipótese científica é apresentada. Um interesse dos usuários (comunidade científica) foi expresso e as exigências de alto nível são criadas. A ideia ainda pode ser desvinculada do objetivo específico da atividade ou de um conceito de medição específico, além de poder estar baseada em uma declaração de problema;

- 2 - **Consolidação de Ideias Científicas:** as evidências e teorias científicas de suporte são estabelecidas abordando uma ou mais ideias científicas. Isto poderia, por exemplo, ser feito com base em referenciais teóricos ou através de experiências laboratoriais. Observações e teorias estão ligadas aos requisitos de usuário consolidados e/ou à declaração de problema. A estratégia científica para enfrentar o desafio científico é definida;

Figura 4 - Escala SRL no contexto da progressão da pesquisa inicial até a ciência madura em aplicações (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2015, p. 5).



- 3 - **Requisitos Científicos e de Observação:** uma primeira iteração de requisitos científicos e de observação de nível superior, isto é, precisão do produto e amostragem temporal e espacial são realizados e mapeados de acordo com os requisitos do usuário. Durante este processo, uma seleção justificada da(s) técnica(s) de medição conceitual é desenvolvida com base em requisitos observacionais derivados;

- 4 - **Prova de Conceito:** o conceito de medição é validado. Um modelo que relaciona parâmetros geofísicos e medições é estabelecido. A sensibilidade das medições

ao parâmetro geofísico alvo é demonstrada através de extensas análises por meio de experimentos dedicados, mas pelo menos através de simulações;

- 5 - Simulações de desempenho de ponta a ponta: um simulador de desempenho de medição de ponta a ponta é desenvolvido, testado e validado usando medições realistas e/ou reais. O modelo de desempenho utilizado é aplicável a uma gama predefinida de condições (incluindo incertezas realistas de natureza natural e observacional) e pode ser utilizado para abordar as necessidades originadas dos requisitos científicos de uma forma end-to-end. Os algoritmos de recuperação aplicáveis a uma gama realista de fontes de erro (geofísica e técnica) são demonstrados contra uma métrica de desempenho pré-definida, refletindo os requisitos de observação e medição;

- 6 - Ciência e Produtos Consolidados: as recuperações geofísicas consolidadas são estabelecidas e implementadas. Estes são algoritmos de Nível 1, Nível 2 e de ordem mais alta (se aplicável) que fornecem medições e observações que respondem diretamente aos requisitos de medição e observação da Atividade;

- 7 - Ciência comprovada: algoritmos de recuperação verificados usando medidas de atividade de missão real. As incertezas de recuperação são fornecidas e mapeadas de acordo com os requisitos de medição e observação da Atividade;

- 8 - Ciência Madura e validada: os produtos de dados são sistematicamente gerados e disseminados. As metas e objetivos científicos da Missão são testados e avaliados. O objetivo científico é testado. Ciência ligada à Atividade da Missão está avançando levando a uma crescente comunidade científica, novas aplicações e novos conhecimentos científicos;

- 9 - Quantificação do Impacto da Ciência: as medições e observações foram reprocessadas garantindo conjuntos de dados de alta qualidade. O objetivo científico e o objetivo da Atividade da Missão são avaliados. O impacto científico de ponta a ponta em toda a Atividade da Missão relativamente aos requisitos do utilizador é avaliado e quantificado. Os requisitos foram revisados e baseados no resultado, estratégias futuras estão sendo discutidas.

Em suma, o SRL, apesar de ter sido aplicado pela Agência Espacial Europeia para projetos na área aeroespacial, merece ser explorado para a análise da prontidão de projetos científicos visando o desenvolvimento de produtos ou serviços inovadores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos apresentados para medir níveis de prontidão possibilitam uma avaliação abrangente das capacidades que a empresa precisa desenvolver para capitalizar uma ideia ou projeto. O uso do IRL possibilita uma expectativa de melhoria na capacidade de uma empresa concentrar sua atenção corporativa e garantir o sucesso de um conjunto de ideias com chances reais de impactar um modelo de negócios planejado ou previsto. O TRL aponta as etapas necessárias para que uma tecnologia chegue ao mercado. O SRL possibilita identificar o nível de prontidão de uma pesquisa, indicando o esforço necessário para que possa se tornar um produto ou serviço.

O modelo apresentado no Quadro 2 é o mais abrangente e adequado para as empresas nascentes por definir uma matriz com os cinco aspectos-chave e conceitos dos níveis de prontidão para a inovação. Cabe ressaltar que a tecnologia é apenas um aspecto a ser considerado pelas empresas nascentes. Os outros quatro aspectos completam a orientação sobre o processo de inovação para alcançar o mercado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de pesquisa desenvolvida na Universidade Católica de Brasília com apoio financeiro Associação para a Promoção da Excelência do Software Brasileiro – Softex.

REFERÊNCIAS

ABDELSHAFY, A.; WALTHER, G. Coupling carbon capture and utilization with the construction industry: Opportunities in Western Germany. **Journal of CO2 Utilization**, v. 57, Article in Press, 2022.

ALTUNOK, T.; CAKMAK, T. A Technology Readiness Levels (TRLs) calculator software for systems engineering and technology management tool. **Advances in Engineering Software**, v. 41, n. 5, p. 769-778, 2010.

ANDWARI, A. M.; PESIRIDIS, A.; RAJOO, S.; MARTINEZ-BOTAS, R.; ESFAHANIAN, V. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 414–430, 2017.

BLANK, S. G. **The Four Steps to the Epiphany** - Successful Strategies for Products that Win. 2nd Ed. Lulu Press, 2006.

CANADA. Defence Research and Development Canada. **A Technology Maturity Measurement System for the Department of National Defence: The TML System**. DRDC Atlantic CR 2005-279, 2006.

CARMACK, W.J.; BRAASE, L.A.; WIGELAND, R.A.; TODOSOW, M. Technology readiness levels for advanced nuclear fuels and materials development. **Nuclear Engineering and Design**, v. 313, p. 177-184, 2017.

CHARALAMBOUS, G.; FLETCHER, S.R.; WEBB, P. The development of a Human Factors Readiness Level tool for implementing industrial human-robot collaboration. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, p. 2465-2475, 2017.

CÔRTEZ, M. R.; PINHO, M.; FERNANDES, A. C.; SMOLKA, R. B.; BARRETO, A. L. Cooperação em empresas de base tecnológica: uma primeira avaliação baseada numa pesquisa abrangente. **São Paulo em Perspectiva**, v. 19, n. 1, p. 85-94, 2005.

DI SANTE, R. (2015). Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 8, p. 18666–18713, 2015.

DOYLE, P. **Marketing Management and Strategy**. 3 Ed, Harlow: Financial Times/Prentice Hall, 2002.

EVANS, J. D.; JOHNSON, R. O. Tools for managing early-stage Business Model Innovation. **Research-Technology Management**, v. 56, n. 5. p. 52-56, 2013.

EUROPEAN SPACE AGENCY. European Space Research and Technology Centre. (2015). **Scientific Readiness Levels (SRL) Handbook**. Leiden, NL: Mission Science Division (EOP-SM), 2015.

GOFFIN, K.; MITCHELL, R. **Innovation Management**. New York:Palgrave Macmillan, 2005.

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

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 16290:2013 - Space systems - Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment**, 2015.

KAUR, A. P.; SINGH, M. (2022). Design and development of a three-phase Net Meter for V2G enabled charging stations of electric vehicles. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 30, Article in Press, 2022.

KAWASAKI, G. **A arte do começo**. 4 ed. Rio de Janeiro: Best Seller, 2011.

KLAR, D.; FRISHAMMAR, J.; ROMAN, V.; HALLBERG, D. A Technology Readiness Level scale for iron and steel industries. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 43, n. 7, p. 494-499, 2016.

LARGENT, M. C. (2003). **A Probabilistic Risk Management Based Process for Planning and Management of Technology Development**. Thesis for the Degree Doctor of Philosophy in Aerospace Engineering. Georgia Institute of Technology, 2003.

LEE, M.; CHANG, T.; CHIEN, W. C. An approach for developing concept of Innovation Readiness Levels. **International Journal of Managing Information Technology**, v. 3, n. 2, p. 18-37, 2011.

LEIFER, I.; LEHR, W. J.; SIMECEK-BEATTY, D.; BRADLEY, E.; CLARK, R.; DENNISON, P.; HU, Y.; MATHESON, S.; JONES, C. E.; HOLT, B.; REIF, M.; ROBERTS, D. A.; SVEJKOVSKY, J.; SWAYZE, G.; & WOZENCRAFT, J. (2012). State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 185–209, 2012.

LEITE, L. F.; MENDES, F. M. L.; PARREIRAS, V. M. A.; GOMES, F. A. M.; WIEZEL, J. G. G. Developing a technology readiness assessment methodology for an energy company. In: **24th International Association for Management of Technology Conference, Proceedings**, p. 2026-2039, 2015.

MANKINS, J. C. (1995). **Technology Readiness Levels**. Office of Space Access and Technology NASA, 1995.

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

MITTAL, S.; KHAN, M. A.; ROMERO, D.; WUEST, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). **Journal of Manufacturing Systems**, v. 49, p. 194–214, 2018.

MOORE, G. **Crossing the chasm**. New York: Harper Business, 1999.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **HRST Technology**

Assessments. 2000. Disponível em: <<http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trlchrt.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Technology Readiness Levels Demystified.** 2010. Disponível em: <http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/trl_demystified.html>. Acesso em: 18 dez. 2016.

OKOLIE, J. A.; EPELLE, E. I.; TABAT, M. E.; ORIVRI, U.; AMENAGHAWON, A. N.; OKOYE, P. U.; GUNES, B. Waste biomass valorization for the production of biofuels and value-added products: A comprehensive review of thermochemical, biological and integrated processes. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 159, p. 323–344, 2022.

RIES, E. A startup enxuta: como os empreendedores atuais utilizam a inovação contínua para criar empresas extremamente bem-sucedidas. São Paulo, SP: Lua de Papel, 2012.

SADIN, S. R.; POVINELLI, F. P.; ROSEN, R. The NASA technology push towards future space mission systems. *Acta Astronautica*, v. 20, n. 4, p. 73-77, 1989.

SCHUMPETER, J. **The Theory of Economic Development.** Cambridge, MA: Harvard University Press, 1934.

SMALL, H. Update on science mapping: Creating large document spaces. *Scientometrics*, v. 38, p. 275–293, 1997.

SOARES, L.; & WANG, H. (2022). A study on renewed perspectives of electrified road for wireless power transfer of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 158, Article in Press, 2022.

TAO, L. **Developing the Concept** – Innovation Readiness Levels (IRL). Centre for Technology Management. University of Cambridge, 2010.

TAO, L.; PROBERT, D.; PHAAL, R. Towards an integrated framework for managing the process of innovation. *R&D Management*, v. 40, n. 1, p. 19-30, 2010.

TERZIS, D. (2022). Monitoring innovation metrics in construction and civil engineering: Trends, drivers and laggards. *Developments in the Built Environment*, v. 9, Article in Press, 2022.

USA. Department of Energy. **Technology Readiness Assessment Guide.** DOE G 413.3-4. Washington, DC: U.S. Department of Energy - Office of Management, 2009.

USA. Department of Energy. **Technology Readiness Assessment (TRA)/Technology Maturation Plan (TMP) - Process Implementation Guide.** Washington, DC: U.S. Department of Energy - Office of Environmental Management, 2013

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer manual.** Leiden: Universiteit Leiden, 2021.