

PROTOTIPAGEM DE IMPLANTAÇÃO DE CALCULADORA TECNOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL) NA EMPRESA VALE S/A

Samuel Pereira Cardoso; Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará; samuel.card12@unifesspa.edu.br
Franco Jefferds dos Santos; Instituto Tecnológico de Aeronáutica; jefferds@ita.br
Kleiton Gonçalves Lovati; Centro Universitário de Volta Redonda; kleitton.lovati@vale.com
Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto; Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará;
cbasquerotto@unifesspa.edu.br

RESUMO

A avaliação dos Níveis de Maturidade Tecnológica (*Technology Readiness Levels* - TRL) é amplamente utilizada para padronizar e facilitar a comunicação sobre tecnologias. No Brasil, instituições como BiotechTown, FINEP, BNDES, EMPRAPII e EMBRAPA aplicam o TRL para orientar suas estratégias de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I). Este estudo foca na aplicação do TRL na Vale S/A, foi desenvolvida uma ferramenta digital *GreenTax TRL* para classificar a maturidade tecnológica de suas inovações. O método qualitativo envolveu criar um *site* com interfaces para os nove níveis TRL, permitindo a categorização e avaliação das tecnologias da empresa. Os resultados mostraram que o TRL trouxe benefícios significativos para a gestão de tecnologias na Vale S/A, ajudando na avaliação da relação custo-benefício das inovações e no alinhamento com objetivos estratégicos e práticas de sustentabilidade. Contudo, a padronização completa do TRL ainda é um desafio para a empresa. Apesar de ter integrado o TRL em alguns projetos, a Vale enfrenta dificuldades na universalização da métrica, necessitando de uma abordagem uniforme para avaliação em toda a organização. A conclusão destaca que o TRL é uma ferramenta eficaz para a gestão e avaliação da maturidade tecnológica, promovendo inovação e alinhamento estratégico. A Vale S/A avançou com a implementação do TRL e o produto desenvolvido certamente integrará completamente o TRL em todos os setores para fortalecer sua capacidade de inovação e gestão de tecnologias para fins de tomadas de decisões.

Palavras-chave: Tecnologia; Mineração; Vales S/A; Calculadora TRL.

Data de recebimento: 03/09/2024

Data do aceite de publicação: 01/12/2024

Data da publicação: 30/12/2024

PROTOTYPING OF IMPLEMENTATION OF TECHNOLOGICAL CALCULATOR FOR ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL MATURITY LEVEL (TRL) AT VALE S/A

ABSTRACT

The assessment of Technology Readiness Levels (TRL) is widely used to standardize and facilitate communication about technologies. In Brazil, institutions such as BiotechTown, FINEP, BNDES, EMPRAPII, and EMBRAPA apply TRL to guide their Research, Development, and Innovation (R&D) strategies. This study focuses on the application of TRL at Vale S/A, where a digital tool called GreenTax was developed to classify the technological maturity of its innovations. The qualitative method involved creating a website with interfaces for the nine TRL levels, enabling the categorization and evaluation of the company's technologies. The results showed that TRL brought significant benefits to technology management at Vale S/A, aiding in the evaluation of the cost-benefit relationship of innovations and aligning with strategic goals and sustainability practices. However, full standardization of TRL remains a challenge for the company. Despite integrating TRL into some projects, Vale faces difficulties in universalizing the metric, needing a uniform approach for evaluation across the organization. The conclusion highlights that TRL is an effective tool for managing and assessing technological maturity, promoting innovation and strategic alignment. Vale S/A has made progress with the implementation of TRL, and the developed product will certainly fully integrate TRL across all sectors to strengthen its capacity for innovation and technology management for decision-making purposes.

Keywords: Technology; Mining; Vale S/A; TRL Calculator.

INTRODUÇÃO

A competitividade e a posição das empresas no mercado são diretamente influenciadas pela evolução tecnológica e pela adoção de medidas inovadoras. A capacidade de transformar ideias em produtos, serviços e processos criativos é essencial para garantir essa competitividade. Empresas que buscam destaque no mundo das tecnologias precisam de ferramentas para avaliar o grau de prontidão tecnológica de seus produtos, o que lhes permite monitorar e melhorar o processo de inovação, assegurando eficiência e competitividade (Carvalho, Reis e Calvalcante, 2011).

No contexto dos sistemas de inovação, o gerenciamento adequado das tecnologias provenientes das atividades de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) é crucial. Um gerenciamento estratégico e cuidadoso favorece a competitividade, desde a identificação de oportunidades de mercado até a comercialização de produtos. Empresas que adotam uma abordagem estratégica no gerenciamento de suas tecnologias podem maximizar benefícios e minimizar riscos (Neto e Trabasso, 2015).

O *Technology Readiness Levels* (TRL), ou Níveis de Prontidão de Tecnologia, desenvolvido pela NASA na década de 1970, é uma metodologia eficaz para avaliar o desenvolvimento de tecnologias, permitindo uma leitura clara da maturidade tecnológica. Essa abordagem ajuda as empresas a gerenciar suas tecnologias de forma estratégica, avaliando o grau de desenvolvimento e a efetividade de suas inovações. O TRL é útil para definir prioridades de investimento, identificar oportunidades de melhoria e avaliar riscos (Ferreira e Carvalho, 2021). Em 2013, o TRL foi oficializado pela norma ISO 16290:2013 (Valente, 2021).

No Brasil, o TRL foi nacionalizado pela ABNT em 2015, com a criação da NBR ISO 16290:2015. A aplicação do TRL tem sido fundamental para a organização e progresso de tecnologias, promovendo ações inovadoras. Em particular, na indústria de mineração, o TRL ajuda a enfrentar desafios relacionados ao desenvolvimento e adoção de novas tecnologias, focando em aumentar a competitividade do setor e reduzir impactos ambientais e sociais. A

colaboração e a organização sistemática das tecnologias são essenciais para atender às exigências do setor e fomentar a sustentabilidade (IBRAM, 2022).

No contexto brasileiro, menciona-se exemplos de organizações impulsionadoras de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação que adotam o TRL, tais como o BiotechTown, a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), a EMPRAPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial) e EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) (BiotechTown, 2021).

A empresa Vale é reconhecida como uma das principais e maiores empresa no setor de mineração no Brasil e no mundo. A empresa se destaca por sua postura inovadora e pelos investimentos em tecnologia. Ao realizar um levantamento na empresa, foi possível constatar que ela tem realizado avaliações de suas tecnologias com base na maturidade tecnológica, inicialmente por meio de conceitos elaborados por ela por meio de gestão interna com *roadmaps*, e depois a partir do ano de 2022, a Vale S/A consolidou o padrão TRL, isso devido aos programas nacionais e internacionais que faz parte, contudo, sem uma adesão completa na companhia.

O objetivo da presente pesquisa é entregar à Vale S/A um protótipo de calculadora TRL, ferramenta que permitirá à empresa organizar suas tecnologias e alinhá-las com padrões nacionais e internacionais. Esse protótipo visa não apenas a padronização interna e a otimização dos processos de inovação, mas também posicionar a Vale uma referência em inovação e tecnologia no setor de mineração. Ao adotar a metodologia TRL, a Vale demonstra seu compromisso com a excelência tecnológica e a sustentabilidade, estabelecendo-se como um exemplo a ser seguido por outras empresas. A implementação desse sistema não só aprimora a capacidade da empresa de competir globalmente, mas também reforça sua liderança em práticas inovadoras e sustentáveis no setor.

MATURIDADE TECNOLÓGICA E O USO DE TRL

Analisar os ciclos de vida de uma inovação é um fator essencial para a competitividade e o desenvolvimento empresarial, especialmente em empresas que se destacam no quesito tecnológico. A maturidade tecnológica de uma tecnologia é crucial, pois os riscos associados à inovação variam significativamente de acordo com o nível de maturidade da tecnologia (Joana, 2022).

Um produto ou serviço, durante seu processo de desenvolvimento, evolui de um estágio inicial de estrutura, forma ou função para um estágio mais avançado, passando por uma série de etapas intermediárias. Dessa forma, um modelo de maturidade pode ser visualizado como uma estrutura com vários níveis sucessivos em direção à melhoria do produto até alcançar sua fase final. Cada nível exige o cumprimento de critérios específicos para ser considerado alcançado, permitindo a transição para o próximo nível Barbosa (2018).

Fomentando a importância de observar o grau de maturidade tecnológica, Quintela *et al.* (2019) destacam várias vantagens, incluindo a avaliação de se a tecnologia pode ser introduzida no mercado, a verificação de estimativas de investimentos e riscos financeiros, e a permanência da inovação no mercado. Além disso, a avaliação da maturidade tecnológica permite a definição do potencial de desenvolvimento da tecnologia, a identificação de ações para minimizar gargalos tecnológicos, e a criação de um entendimento comum sobre o estado de uma tecnologia. Essa avaliação é crucial para a tomada de decisões estratégicas e para o gerenciamento do progresso das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) dentro de uma organização. A familiarização com o progresso da tecnologia avaliada é essencial para que a empresa possa usar tendências e inovações tecnológicas relacionadas à área em questão, visando aprimorar os resultados de seus negócios e garantir a constante evolução das ferramentas ou sistemas tecnológicos utilizados na organização.

O conceito de “maturidade tecnológica” já vem sendo utilizado desde a década de 1950. Inicialmente, este termo estava associado às necessidades humanas, ao crescimento econômico e ao avanço da tecnologia da informação nas organizações, sendo considerado um princípio fundamental na evolução de uma inovação (Neto e Trabasso, 2015). Durante a Guerra Fria, o governo dos Estados Unidos investiu em diversas tecnologias militares, como mísseis balísticos, sistemas de radares e computadores. Para avaliar a eficácia desses projetos, era necessário estabelecer um critério objetivo para medir sua prontidão, marcando o início da avaliação da maturidade tecnológica. Contudo, nessa época, ainda não existiam escalas padronizadas para classificar as tecnologias em diferentes níveis de maturidade (Medeiro, 2004).

Na década de 1960, mais especificamente em 1963, o presidente dos Estados Unidos, John F. Kennedy, criou o Escritório de Tecnologia e Avaliação de Prontidão (OTAR) para avaliar a prontidão tecnológica dos projetos do governo. Este escritório utilizava uma escala de cinco pontos para avaliar a maturidade tecnológica, incluindo as fases de conceito, pesquisa e desenvolvimento, testes em solo, testes em voo e operação. No Brasil, durante esta década, a Força Aérea Brasileira (FAB) também começou a adotar a avaliação de prontidão tecnológica em seus projetos, embora ainda não houvesse uma escala padronizada (Silva, 2012).

Foi na década de 1970 que o conceito de maturidade tecnológica começou a ser formalizado através de escalas, conhecidas como *Technology Readiness Levels* (TRL), formuladas com o objetivo de fornecer uma medida do estado de desenvolvimento de uma tecnologia em relação ao seu uso em sistemas aeroespaciais. Essa formalização tornou-se uma parte crucial na análise de riscos de projetos e na tomada de decisões (Vieira, 2021).

A escala de TRL foi idealizada e elaborada em 1974 por Stan Sadin, pesquisador da NASA. Em 1989, foi formalizada em sete níveis e, somente em 1995, a NASA adotou a definição atual, que consiste em nove níveis (Quintella *et al.*, 2019). Essa formalização da maturidade tecnológica por meio dos estudos da NASA consolidou o uso do TRL em diversos setores, tornando-se uma ferramenta importante na avaliação de tecnologias e projetos, especialmente nas indústrias aeroespacial e de defesa.

Os níveis variam de TRL 1 a TRL 9, com os níveis mais baixos relacionados à pesquisa básica da tecnologia e os mais elevados ao aprimoramento de sistemas e subsistemas, visando o lançamento do produto ou tecnologia no mercado (Rodrigues, 2022). A disseminação global da versão padrão de nove níveis ocorreu principalmente entre 2005 e 2006, sendo adotada por diversas instituições governamentais e privadas, como o Departamento de Defesa dos EUA, o Departamento de Energia dos EUA, o Programa de Inovação e Comercialização do Canadá e a Agência Espacial Europeia (Quintella *et al.*, 2019).

No Brasil, o conceito de TRL foi nacionalizado em 2015 com a criação da NBR ISO 16290:2015 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A ABNT adaptou o conteúdo da ISO 16290:2013, que originalmente tinha como foco o setor aeroespacial, para ser aplicado em diversos setores de atividades, incluindo o ramo de tecnologia da informação e outros (ABNT, 2015). A norma NBR ISO 16290:2015 descreve os nove níveis de TRL:

- a) TRL 1: Princípios básicos observados por meios de pesquisa acadêmica, sem definição conceitual e requisitos de desempenho;
- b) TRL 2: Definição dos princípios básicos estudados anteriormente e as aplicações conceituais são mencionadas de forma consistente. Pode não haver prova ou análise detalhada para dar suporte às aplicações conceituais;
- c) TRL 3: Prova de conceito, através de modelagem, simulação e experimentação. Os requisitos de desempenho funcional estão estabelecidos e os objetivos estão definidos em relação ao atual estado da arte. Os estudos analíticos e laboratoriais são essenciais para a validação do conceito;

- d) TRL 4: Validação funcional da invenção comprovada por testes em ambiente laboratorial, bancada, simulação computacional ou experimentação que demonstre o desempenho funcional básico do elemento. A verificação de “baixa fidelidade”, comparada com o sistema final, está limitada ao ambiente de laboratório;
- e) TRL 5: Demonstração das funções do elemento estudado em ambiente relevante, porém não tem escala real e nem todas as funções estão integradas. Geralmente realizadas em escala piloto. Requisitos em falta ou incompletos são aceitáveis neste estágio na medida em que isto não afeta a identificação das funções críticas da invenção;
- f) TRL 6: Demonstração das funções integradas do elemento estudado em ambiente relevante visando atender aos requisitos de desempenho operacional, previamente acordados pelos *stakeholders* para sua integração ao sistema. Pode haver realização de protótipos ou testes de curta duração em ambiente operacional;
- g) TRL 7: Teste de desempenho do elemento em um ambiente que replica todas as condições necessárias do ambiente operacional real com tempo de execução, suficiente para analisar o desempenho da tecnologia;
- h) TRL 8: O elemento é integrado ao sistema final e aceito pelo cliente. O escalonamento e definido em comum acordo entre as partes interessadas;
- i) TRL 9: O último nível de maturidade tecnológica é o TRL 9 (Comercial), em que a tecnologia desenvolvida está madura e em serviço para sua missão designada no ambiente operacional real. Não é abordado nenhum marco ou requisito mínimo nessa etapa pois a tecnologia já está comissionada e em fase inicial de operação ou possui um modelo de negócio específico.

Essa normatização é fundamental para estabelecer uma linguagem comum e universal sobre o desenvolvimento e a maturidade das tecnologias, sendo amplamente adotada tanto por organizações governamentais quanto por empresas privadas, contribuindo para o desenvolvimento de inovações em diversos setores da economia (Valente, 2021).

O USO DE TRL EM ORGANIZAÇÕES E EMPRESAS

A aplicação das escalas de Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) nas organizações tem crescido significativamente, proporcionando uma padronização global na classificação de tecnologias. Esse método é amplamente utilizado em diversos setores, desde tecnologias espaciais, como as da NASA, até no ecossistema de inovação, englobando o desenvolvimento de projetos e a transferência de tecnologias. No Brasil, várias organizações que impulsionam a Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), como o BiotechTown, FINEP, BNDES, EMPRAPII e EMBRAPA, adotam o TRL para guiar suas estratégias de inovação (BiotechTown, 2021).

A EMPRAPII, por exemplo, indica claramente os níveis de maturidade tecnológica que recebem apoio, abrangendo os níveis TRL 3 a TRL 6, demonstrando seu compromisso com o desenvolvimento tecnológico. Similarmente, a EMBRAPA utiliza a escala TRL para facilitar a comunicação entre gestores, equipes internas e parceiros externos, ajudando a identificar o estágio de desenvolvimento de ativos específicos e os recursos necessários para avanços tecnológicos. Isso também contribui para a identificação de oportunidades de negócios e transferência de tecnologias, promovendo uma evolução tecnológica contínua (Valente, 2021).

A adoção do método TRL não se restringe apenas a grandes empresas ou instituições, mas também beneficia pesquisadores e empreendedores que buscam apoio financeiro para seus projetos. Investidores, mesmo sem conhecimento especializado, conseguem entender o estágio de desenvolvimento das tecnologias, o que facilita a prospecção e a transferência tecnológica.

Essa linguagem universal sobre o nível de maturidade tecnológica é crucial para criar uma compreensão comum entre diversos stakeholders (BiotechTown, 2021).

No âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), a estrutura organizacional é baseada nos níveis de maturidade tecnológica, com secretarias responsáveis desde a pesquisa básica até a finalização do produto. Em outubro de 2022, o MCTIC instituiu a calculadora de maturidade tecnológica baseada no TRL, por meio da Portaria nº 6.449. Essa ferramenta visa fortalecer o uso de métricas para avaliar a maturidade dos projetos de PD&I, ampliando a capacidade de captação de recursos financeiros por meio da classificação dos projetos conforme suas características (Martin *et al.*, 2019) (Brasil, 2022).

Empresas privadas também têm demonstrado interesse crescente na adoção do TRL. Por exemplo, a Petrobras, através do projeto "Petrobras Conexões para Inovação", exige a identificação do nível de prontidão tecnológica das inovações submetidas. A Vale, apesar de não ter divulgado muitos detalhes, também adotou o padrão TRL para gerenciar suas tecnologias (Petrobras, 2022).

Outras empresas, como Suzano, Ambev, Gerdau, Aliansce Sonae e Raízen, também estão adotando práticas que envolvem a avaliação de maturidade tecnológica, embora nem todas utilizem formalmente o TRL. A Suzano, por exemplo, requer que startups participantes de seu programa de aceleração estejam em um nível TRL 3 ou superior. Já a Ambev e a Gerdau valorizam inovações em estágios avançados de maturidade. Essas empresas demonstram um compromisso contínuo com a inovação e a sustentabilidade, integrando o TRL ou práticas similares em suas operações e parcerias estratégicas (Bora Investir, 2023).

A EMPRESA VALE S/A E O USO DE TRL

A história da Vale é rica e multifacetada, refletindo as vivências, experiências e aprendizados que moldaram a empresa ao longo dos anos. Segundo o acervo histórico da empresa, disponível no “Espaço Memória”, suas raízes estão profundamente ligadas ao desenvolvimento da mineração no Brasil. Desde os primórdios, com a criação da ferrovia e a exploração das jazidas de ferro de Itabira, a Vale destacou-se no mercado internacional com um olhar para o futuro, comprometendo-se com a prosperidade, a inovação tecnológica e a sustentabilidade ambiental (Vale, 2023).

A trajetória oficial da Vale começou no século XIX, mais precisamente em 1904, com a criação da Estrada de Ferro Vitória a Minas. Em 1908, a descoberta das jazidas de ferro de Itabira atraiu o interesse de engenheiros ingleses, que fundaram o *Brazilian Hematite Syndicate*. Em 1911, esta organização foi substituída pela Itabira *Iron Ore Company*, que visava explorar as riquezas minerais da região. A busca pela nacionalização das reservas minerais, no entanto, intensificou-se durante o governo Vargas, culminando na caducidade do contrato da Itabira Iron Ore em 1939 (Carvalho, 1978; Ribeiro, 1986).

A nacionalização das reservas minerais estratégicas foi um marco crucial para a Vale e para o Brasil. Em 1942, os acordos de Washington determinaram que o governo britânico transferisse ao governo brasileiro as jazidas de minério de ferro pertencentes à *Itabira Iron Ore*, assegurando o controle brasileiro sobre esses recursos. Nesse contexto, a criação da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) consolidou a posse e o controle de infraestruturas vitais como a Estrada de Ferro Vitória a Minas, essencial para o escoamento eficiente do minério de ferro e outros minerais para o mercado internacional (Pimenta, 1981).

A consolidação da Vale como uma das maiores empresas de mineração do Brasil continuou com eventos significativos como o leilão de ações na Bolsa de Valores do Rio de Janeiro em 1956 e a inauguração do Porto de Tubarão em 1966. A descoberta de grandes depósitos minerais na região de Carajás na década de 1960, particularmente a partir das prospecções lideradas por Breno Augusto dos Santos, marcou um novo capítulo na história da

mineração no Brasil e na expansão da Vale. Esses desenvolvimentos permitiram à empresa aumentar sua capacidade de exportação e atender à crescente demanda global por minério de ferro (Fernandes, 1982; Vale, 2023).

A diversificação e internacionalização da Vale continuaram nos anos seguintes, especialmente com a aquisição da mineradora canadense Inco em 2006. Esta aquisição permitiu à Vale ingressar no mercado de níquel, ampliando seu portfólio e alcance global. A criação de uma nova marca em 2007 e a adoção do nome "Vale" simbolizaram a transição para uma identidade mais forte e reconhecida internacionalmente. A empresa também demonstrou um compromisso crescente com a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental, como evidenciado pela participação em iniciativas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Vale, 2023).

A empresa Vale tem se destacado ao longo de sua história por sua posição significativa em avanços tecnológicos, o que é evidenciado por sua reputação global no setor de mineração. A empresa tem demonstrado um compromisso com a atualização tecnológica e a sustentabilidade, garantindo a segurança de suas operações e a proteção ambiental. O gerenciamento de tecnologias na Vale é crucial, pois está intimamente ligado ao sistema de inovação da empresa, que busca continuamente melhorar o desempenho e expandir as oportunidades de inovação (Marques, 2020).

Para aprimorar o gerenciamento das tecnologias, a Vale S.A. passou por uma reestruturação, alinhando projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&DI) com os interesses e estratégias da empresa, foi em 2019, que a Vale introduziu um modelo de *roadmap* genérico para monitorar o progresso, maturidade e relevância dos projetos, os projetos foram organizados em *roadmaps* tecnológicos que incorporam aspectos de sustentabilidade e proteção socioambiental, refletindo a orientação geral da empresa (Marques, 2020).

O modelo de *roadmap*, utilizava um sistema integrado de gestão de P&DI, agrupando projetos relacionados e medindo seu impacto através de Indicadores-Chave de Desempenho (KPI). Esse sistema visava alinhar as atividades de inovação com os objetivos de negócio da empresa, garantindo a eficácia e sustentabilidade das iniciativas (Teixeira, Caldara e Junges, 2019).

A abordagem adotada pela Vale também abrange toda a cadeia de valor do negócio, incluindo mineração, exploração e marketing técnico. As fases transversais, como manutenção e eficiência energética, consideradas para maximizar as sinergias entre as iniciativas (Teixeira, Caldara e Junges, 2019). O processo de gestão iniciava com a captura de ideias e projetos, passando por várias etapas de avaliação até os testes industriais, com o objetivo de reduzir riscos e custos.

Em 2020 e 2021, a Vale começou a aplicar conceitos de maturidade tecnológica mais detalhados, usando a curva marginal de abatimento para avaliar a relação custo-benefício dos projetos e suas contribuições para a redução de emissões. A maturidade dos projetos passou a ser avaliada com uma abordagem mais atualizada, dessa vez com cinco níveis de conceito, desde Pesquisa Básica até a comercialização (Marques, 2020).

No entanto, conforme informações extraídas em estudo de caso com reuniões realizadas com a empresa, tem-se que a empresa enfrenta o desafio de padronizar a avaliação da maturidade tecnológica em todos os setores de forma que toda a instituição faça adesão da métrica. Embora a métrica TRL tenha sido introduzida em novembro de em 2022 para alguns projetos específicos, a sua adesão ainda não é completa na organização. Assim a Vale está considerando a necessidade de uma métrica única para harmonizar a avaliação das tecnologias, conforme as exigências de inovação aberta e demandas legais (Vale, 2023).

A Vitrine Tecnológica da Vale apresenta um portfólio de patentes e tecnologias disponíveis para licenciamento, mas não fornece informações sobre o grau de maturidade das

tecnologias. Assim surge uma necessidade de desenvolvimento de estratégias para desenvolvimento de uma medida que torne a métrica universal para avaliação da maturidade tecnológica. A adesão completa ao TRL é um objetivo a ser alcançado para garantir uma linguagem uniforme sobre as tecnologias da empresa (Vale, 2023).

A aplicação da métrica TRL na empresa Vale, destacando seu papel na gestão da maturidade tecnológica e os desafios enfrentados se faz na parceria entre a Vale, a Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) e a Fundação de Apoio à Pesquisa (FUNAPE) que resultou no Convênio 001/2020, com foco em solucionar desafios tecnológicos e realizar pesquisas relacionadas às operações industriais da Vale.

Em 2022, a Vale lançou um edital para desenvolver Trabalhos de Conclusão de Curso sobre a aplicação do TRL na priorização de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI). O projeto visava melhorar o gerenciamento de tecnologias na cadeia de mineração da empresa, utilizando o TRL para garantir segurança e eficácia na prospecção e transferência de tecnologias.

A pesquisa identificou que a adoção do TRL é comum em diversas empresas e setores, destacando sua importância como uma ferramenta padronizada e universal para a avaliação da maturidade tecnológica e identificou também que alinhado a isso o TRL é utilizado na Vale para gerenciar o progresso de tecnologias desde a concepção até o lançamento no mercado, contudo, com restrições a alguns setores, sendo um desafio a companhia criar medidas de democratizar a métrica, tornando uma adesão completa em todos os setores.

Apesar dos desafios, como a dificuldade de acesso a centros administrativos e a disponibilidade limitada dos gestores, o projeto demonstrou que a Vale tem uma forte capacidade de inovação, alinhando-se às práticas de sustentabilidade e ao desenvolvimento tecnológico. A Vale utilizava *roadmaps* para avaliações de maturidade tecnológica, categorizando as tecnologias em fases como Estudos, Bancada, Piloto e Testes Industriais, o que ajudava a estruturar e monitorar os projetos de PDI, vindo a evoluir para utilização de TRL como gerenciamento, contudo, sem adesão completa na instituição, inclusive sendo identificada a ausência de acessibilidade ao tema, como ausência de abordagem ao tema em seu site sobre maturidade tecnológica, ausência métricas específicas, e ausência de uma calculadora automática de avaliação para facilitar as análises de suas tecnologias.

O estudo observa que a aplicação do TRL é crucial para fortalecer a gestão de tecnologias, melhora a tomada de decisões e garante a eficácia das iniciativas de inovação na Vale.

METODOLOGIA

Essa pesquisa utiliza o método qualitativo, que na perspectiva de Prodanov e Freitas (2013, p. 87), “O pesquisador mantém contato direto com o ambiente e o objeto de estudo em questão [...] as questões são estudadas no ambiente em que elas se apresentam”, assim o trabalho estará em contato com pesquisadores que se dispuserem utilizar a calculadora TRL.

Como produto deste estudo, sendo considerada uma estratégia de aproximar a Vale S.A a uma adesão completa da métrica TRL, foi proposto a construção de uma calculadora TRL a partir de um suporte virtual denominado *website*, a fim de construir uma categorização, classificação e avaliação dos níveis de maturidade ou prontidão tecnológica das tecnologias utilizadas pela empresa Vale S/A. Essa ferramenta teve como base os conceitos elaborados em TRL da NASA e os conceitos nacionalizado pela NBR ISO 16290:2015, a qual foi traduzida e adaptada para a realidade da empresa de mineração, além de definir novas propostas no modelo, tornando-a mais prática e direcionada ao que se propõe a realizar.

O produto desenvolvido, deste trabalho, refere-se ao website Calculadora TRL, nominalizada de *GreenTax TRL* (*Green*: remete à rica vegetação e biodiversidade da Amazônia,

sendo uma palavra reconhecida em vários idiomas; *Tax*: uma referência direta à função tributária da calculadora e *TRL*: *Technology Readiness Level*).

A GreenTax *TRL* é uma inovação tecnológica para o setor de mineração, cuja proposta futura seja fazer o gerenciamento das tecnologias com base no seu grau de maturidade tecnológica, o suporte é um website, possui recursos com interfaces intuitivas e ferramentas robustas para preenchimento de dados sobre tecnologias, com o fito de categorização, classificação e avaliação dos níveis de maturidade, e o produto final é um relatório personalizado.

O produto aqui elaborado é composto de perguntas direcionadas à tecnologias utilizadas na Vale S/A, tomando como base de TRL 1 a 9. O usuário ao acessar o site faz as devidas marcações que resultarão num relatório final com o respectivo resultado de definição do nível de prontidão TRL em que a tecnologia se apresenta. O descritivo para manipulação se dá no seguinte processo:

- a) acesso ao site <https://GreenTax-trl.vercel.app/checkout>;
- b) Tela 1: anuncia o nome da calculadora e as 11 etapas a serem cumpridas, consta espaços para preenchimento de dados do projeto cujo são necessários para compor o relatório final da análise da tecnologia, são campos obrigatórios “Título do Projeto”, “Instituição Proponente”, “Pesquisador responsável”, “Pessoa que preencheu o formulário”, “Descrição do Projeto”. Na mesma tela, quando preenchida os dados obrigatórios é autorizado botão “próximo” para seguir para as próximas telas;
- c) Da tela 2 a 10: adentra-se na interface categorização, o usuário terá acesso a cada campo, designado como TRL 1, TRL2, TRL3, TRL4, TRL5, TRL6, TRL7, TRL8 e TRL9. Para cada TRL, haverão interfaces de perguntas, em que o usuário preencherá com “SIM” ou “NÃO”, de forma objetiva;
 - c.1) A TRL 1, consiste em 15 questões pré-definidas. Essas perguntas se relacionam aos princípios básicos observados e relatados sobre a existência de pesquisa científica pertinente à tecnologia em avaliação;
 - c.2) A TRL 2, inclui 14 perguntas pré-definidas. Nesse estágio, inicia-se a relação com o conceito da tecnologia em desenvolvimento e a formulação de sua aplicação. As aplicações são especulativas e podem não ter provas ou análises detalhadas que sustentem as suposições.
 - c.3) A TRL 3, são apresentadas 10 perguntas pré-determinadas. Aqui há prova de conceito analítica e experimental. Os requisitos de desempenho são gerais, definidos de maneira abrangente. Apresentam-se os requisitos de desempenho estabelecidos e os objetivos definidos em relação ao estado da arte ou estado da técnica;
 - c.4) A TRL 4, é composta por 10 questões pré-estabelecidas. Aqui é onde há a verificação funcional em ambiente laboratorial, com maquete integrada para estabelecer que as peças funcionam bem juntas, se for o caso, na demonstração do desempenho funcional básico. Está limitado ao ambiente de laboratório;
 - c.5) A TRL 5, possui 8 perguntas pré-definidas. Nesse estágio, a verificação deve ocorrer em um ambiente relevante, onde as funções críticas possam ser claramente demonstradas e o desempenho nos ensaios esteja em conformidade com as previsões analíticas;
 - c.6) Na TRL 6, são apresentadas 7 questões pré-definidas. Neste ponto do processo de verificação, o modelo deve demonstrar as funções críticas do elemento em um ambiente relevante. O desempenho geral do elemento é, em princípio, demonstrado, com ênfase em garantir que o desempenho nos ensaios esteja de acordo com as previsões analíticas;

- c.7) Na TRL 7, o processo de avaliação envolve 9 questões pré-definidas. Nesta etapa, o modelo deve demonstrar seu desempenho em um ambiente operacional, que replica todas as condições necessárias para comprovar que o elemento funciona de maneira eficaz no contexto real;
- c.8) Na TRL 8, são estabelecidas 6 perguntas pré-definidas. Nesta fase, a tecnologia está completamente desenvolvida e aceita, restando apenas a etapa de produção em nível comercial. Dependendo do caso, pode ser necessária a transferência da tecnologia para produção em massa para atender às demandas do mercado;
- c.9) Na TRL 9, o último nível de prontidão tecnológica, são formuladas 6 perguntas pré-estabelecidas. Nesta fase, o produto real é demonstrado através de operações bem-sucedidas, evidenciando que a tecnologia está madura, pronta e em uso efetivo no ambiente operacional real.
- d) Tela 11: conforme a tecnologia a ser descrita pelo usuário e analisada pela *GreenTax TRL*, o site informará o resultado por meio de um relatório, apresentando: os dados da tecnologia, classificação e avaliação em um relatório que pode ser exportado em PDF aos usuários ao clique das teclas de CTRL + P;
- e) de posse do relatório, este auxiliará o usuário, em sua função e departamento, tomar decisões relativas ao desenvolvimento ou transição da tecnologia em uso.

Com base na *GreenTax TRL*, objetiva-se melhorar a comunicação, pois é essencial para transmitir claramente a maturidade da pesquisa e identificar o público-alvo adequado. Com resultados aprimorados, é possível fazer perguntas-chave dentro de um quadro estruturado, informando pesquisas em andamento com avaliações especializadas e identificando as etapas necessárias para avançar. Além disso, a transição dos resultados para as partes interessadas torna-se mais eficaz. Por fim, a melhoria no gerenciamento do programa de pesquisa estabelece expectativas claras para o progresso da pesquisa, revisando o alinhamento dos projetos com os objetivos do programa, garantindo uma direção coesa e estratégica.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No decorrer do desenvolvimento da pesquisa, tornou-se evidente que a métrica TRL é uma forma estratégica de alinhar as tecnologias em uma linguagem universal, permitindo melhor identificá-las e, eventualmente, melhorar a prospecção e transferência de tecnologia, evidenciando sua segurança. Essa afirmação é embasada em dados que demonstram que empresas e instituições, tanto nacionais quanto internacionais, utilizam a métrica TRL.

No que concerne ao setor de mineração, a literatura não apresenta estudos específicos sobre o uso da TRL, o que destaca a importância de pesquisas como esta para preencher essa lacuna. Ao realizar uma análise específica direcionada à Vale S.A., uma empresa do setor de mineração, verificou-se que a empresa demonstra interesse em integrar a métrica em todos os seus processos de gerenciamento de tecnologias. Contudo, é necessário traçar estratégias para tornar mais acessível o uso das escalas na identificação do estado de suas tecnologias.

Apesar da empresa já utilizar a métrica em alguns de seus processos de inovação, identificou-se que não há adesão completa em todos os setores. Isso evidenciou a necessidade de elaborar uma calculadora que considere as especificidades do setor, abrangendo desde os princípios básicos de uma tecnologia até seu estado final e sua relação de desenvolvimento com a sustentabilidade.

O desenvolvimento da calculadora *GreenTax TRL* representa um avanço significativo para a empresa Vale S/A, ao introduzir uma ferramenta inovadora para a categorização e avaliação das tecnologias utilizadas na mineração. A aplicação do método qualitativo, conforme a abordagem de Prodanov (2013), permitiu um contato direto e contínuo com o ambiente e os

objetos de estudo, facilitando uma análise aprofundada e contextualizada da maturidade tecnológica.

Figura 01 – *Print Screen* da tela inicial da Calculadora *GreenTax TRL*

Fonte: A pesquisa (2024).

Primeiramente, a *GreenTax TRL* permitiu uma comunicação mais clara e eficaz sobre a maturidade das tecnologias da Vale S/A. O uso da calculadora possibilitou uma descrição detalhada dos níveis de prontidão tecnológica, fornecendo uma visão precisa do estágio de desenvolvimento de cada tecnologia. A estrutura de perguntas, adaptada da planilha TRL da NASA com a NBR ISO 16290:2015, garantiu que as informações coletadas fossem relevantes e diretamente aplicáveis ao contexto da mineração, melhorando assim a clareza na transmissão da maturidade da pesquisa.

A categorização e classificação das tecnologias foram aprimoradas com a introdução da *GreenTax TRL*. O processo estruturado de perguntas, que abrange níveis TRL de 1 a 9, possibilitou uma avaliação sistemática e aprofundada das tecnologias em uso. A inclusão de questões levando em conta a especificidade do setor e adaptada às características específicas de cada tecnologia, promoveu uma compreensão mais rica e detalhada do estágio de desenvolvimento.

Os resultados obtidos também destacam uma melhoria significativa na identificação das etapas necessárias para avançar com as tecnologias avaliadas. A *GreenTax TRL* possibilitou uma avaliação especializada e detalhada, informando as etapas subsequentes para a transição das tecnologias para níveis mais avançados. Isso não apenas facilitou a tomada de decisões, mas também ajudou a definir claramente os requisitos e os marcos necessários para o progresso da pesquisa e desenvolvimento.

A ferramenta ajudou a estabelecer expectativas claras para o progresso das tecnologias, alinhando os projetos com os objetivos do programa da Vale S/A. Essa melhoria no gerenciamento foi crucial para garantir que os projetos avancem de maneira coesa e estratégica, alinhando-se com as metas e os objetivos estabelecidos pela empresa.

Além disso, a *GreenTax TRL* proporcionou uma transição mais eficiente dos resultados para as partes interessadas. A capacidade de gerar relatórios personalizados e exportáveis em PDF facilitou a comunicação dos resultados de forma clara e acessível, permitindo que os

stakeholders tomassem decisões informadas com base nas avaliações detalhadas fornecidas pela calculadora.

A análise dos níveis TRL também revelou resultados importantes sobre o estágio de prontidão das tecnologias. No nível TRL 1, a *GreenTax TRL* identificou as bases científicas e a transformação da pesquisa em desenvolvimento aplicado, enquanto nos níveis TRL 2 e 3, destacou a importância da prova de conceito e da definição dos requisitos de desempenho. A ferramenta demonstrou sua eficácia em avaliar a evolução das tecnologias desde a fase conceitual até a verificação em ambientes relevantes e operacionais.

Nos níveis mais avançados, como TRL 7 e TRL 8, a *GreenTax TRL* forneceu uma avaliação crítica da performance das tecnologias em ambientes operacionais e na preparação para a produção em massa. A capacidade da ferramenta de avaliar o desempenho em condições reais e a prontidão para a produção comercial foi essencial para a transição eficaz das tecnologias para o mercado.

Por fim, o nível TRL 9 destacou a maturidade completa das tecnologias, com operações bem-sucedidas e o uso efetivo no ambiente operacional real. A *GreenTax TRL* provou ser uma ferramenta valiosa para validar a prontidão tecnológica e garantir que as inovações estivessem prontas para atender às demandas do mercado e operar de maneira eficaz em condições reais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prototipação da calculadora *GreenTax TRL* para a Vale S/A representa um avanço notável na forma como a empresa lida com a categorização, avaliação e desenvolvimento de suas tecnologias. Esta inovação tecnológica oferece uma abordagem sistemática e estruturada para a avaliação da maturidade das tecnologias, possibilitando à Vale uma gestão mais eficaz de seus projetos tecnológicos, ante a sua pretensão de adesão integral da métrica TRL. Ao adotar a *GreenTax TRL*, a empresa não apenas melhora a precisão na avaliação das tecnologias, mas também reforça seu compromisso com a inovação e a excelência no setor de mineração.

A Vale, como uma das maiores empresas de mineração do mundo, enfrenta constantemente o desafio de equilibrar suas operações com a responsabilidade ambiental. A *GreenTax TRL*, ao fornecer uma análise detalhada dos níveis de prontidão tecnológica, auxilia a empresa na identificação de tecnologias que podem minimizar o impacto ambiental de suas atividades. O uso da calculadora permite à Vale direcionar seus esforços para o desenvolvimento e a implementação de soluções tecnológicas que atendam aos rigorosos padrões ambientais e contribuam para práticas de mineração mais sustentáveis.

No contexto da mineração, a integração de tecnologias avançadas é fundamental para a melhoria contínua e a inovação. A *GreenTax TRL*, com sua abordagem estruturada para a avaliação da maturidade tecnológica, promove um ciclo de inovação ao permitir uma análise precisa e detalhada das tecnologias em uso. Isso não só facilita a identificação de áreas para melhorias e novos desenvolvimentos, mas também incentiva a empresa a adotar soluções inovadoras que podem transformar suas operações e aumentar a eficiência dos processos de mineração.

Além disso, a *GreenTax TRL* representa um passo significativo para a Vale em termos de alinhamento com as melhores práticas internacionais de gestão tecnológica. A adaptação da planilha TRL da NASA e as normas nacionalizadas na NBR ISO 16290:2015 para o contexto específico da mineração e da Vale demonstra a capacidade da empresa em personalizar e otimizar ferramentas de avaliação tecnológica. Este alinhamento não apenas melhora a qualidade da gestão tecnológica, mas também fortalece a posição da Vale como líder em inovação dentro da indústria de mineração global.

Assim, a ferramenta será de grande importância para a companhia, visto que estará disponível em uma plataforma online acessível, ao invés de estar limitada a documentos de

cálculos como planilhas do Excel. A ideia de ter uma plataforma online é permitir que qualquer colaborador da Vale, em qualquer setor envolvido com inovação, possa acessá-la de onde estiver, utilizando um computador, tablet, celular ou qualquer dispositivo com acesso à internet, sem a necessidade de *download*. Isso facilitará a avaliação das inovações da Vale por meio de respostas a um questionário, e o acesso à ferramenta poderá ser disponibilizado diretamente no site da Vale S.A. após a conclusão dos testes. Isso elevará a utilidade e importância da métrica TRL dentro da companhia.

O impacto da *GreenTax TRL* vai além da eficiência operacional; ela também contribui para a construção de um futuro mais sustentável para a mineração. Com uma avaliação mais precisa e uma melhor categorização das tecnologias, a Vale pode priorizar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias que promovem a sustentabilidade ambiental. Isso é essencial para atender às expectativas crescentes da sociedade e dos *stakeholders* em relação às práticas responsáveis de mineração e à preservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Gestão da inovação: avaliação da maturidade da inovação (indústria e tecnologia)*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BARBOSA, Eduardo. *Análise da maturidade tecnológica através da escala Technology Readiness Levels*. 2018. Dissertação (Mestrado em Sociobiodiversidade e Tecnologias Sustentáveis) — Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

BIOTECHTOWN. Technology readiness level: como funciona o método TRL. 2021. Disponível em: <https://biotechtown.com/blog/trl>. Acesso em: 28 jun. 2023.

BORA INVESTIR. As 10 empresas abertas que mais lucraram no Brasil no 1º trimestre de 2023. 2023. Disponível em: <https://borainvestir.b3.com.br/noticias/empresas/as-10-empresas-abertas-que-maisfaturaram-no-brasil-no-1o-trimestre-de-2023/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. MCTI institui a calculadora de maturidade tecnológica baseada no Technology Readiness Level. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2022/10/mcti-institui-a-calculadora-de-maturidade-tecnologica-baseada-no-technology-readiness-level-trl>. Acesso em: 15 jul. 2023.

CARVALHO, Hélio Gomes; REIS, Dálcio Roberto; CALVALCANTE, Márcia Beatriz. *Gestão da inovação*. Curitiba: Aymará, 2011.

CARVALHO, J. M. de. *A escola de minas de ouro preto: o peso da glória*. Rio de Janeiro: Finep/Cia., 1978.

FERNANDES, F. do R. *Os maiores mineradores do Brasil: perfil empresarial do setor mineral brasileiro*. São Paulo: EMEP, 1982.

FERREIRA, João Paulo Correia; CARVALHO, Tecia Vieira. Estudo sobre valoração de tecnologia aplicado ao núcleo de inovação tecnológica do SENAI-CE. *Cadernos de Prospecção*, Universidade Federal da Bahia, v. 14, n. 1, p. 23, jan. 2021.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. Inovação. 2022. Disponível em: <https://ibram.org.br/inovacao>. Acesso em: 03 mai. 2023.

JOANA, Debora Soares. *Implementação de metodologias para gerir e avaliar a maturidade de projetos de PD&I*. 2022. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

MARQUES, M. *Inovação no setor de mineração e suas implicações para o desenvolvimento sustentável*. 2020. Dissertação (Mestrado em Inovação e Empreendedorismo Tecnológico) — Universidade do Porto, Porto, 2020.

MEDEIRO, C. A. *O desenvolvimento tecnológico americano no pós-guerra como um empreendimento militar*. Rio de Janeiro: Ática, 2004.

NETO, Almiro Martins da Silva; TRABASSO, Luiz Gonzaga. Método para avaliação do grau de maturidade tecnológica no processo de desenvolvimento de produtos da indústria metal mecânica. *Revista Processos Químicos*, v. 9, n. 18, p. 343–354, jul. 2015.

PETROBRAS. Petrobras é premiada por inovar com startups. 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/petrobras-e-premiada-por-inovar-com-startups.htm>. Acesso em: 15 jul. 2023.

PIMENTA, D. J. *A Vale do Rio Doce e sua história*. Belo Horizonte: Vega, 1981.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar. *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. Novo Hamburgo: Universidade FEEVALE, 2013.

QUINTELLA, C. M. *et al.* *Maturidade tecnológica: níveis de prontidão TRL*. Cadernos de Prospecção, Rio de Janeiro, 2019.

RIBEIRO, L. R. *Pequena contribuição à história da estrada de ferro Vitória a Minas*. Vitória: Edição do Autor, 1986.

RODRIGUES, Reinaldo Borsato. *Avaliação da maturidade tecnológica em um projeto de PD&I por meio do Technology Readiness Levels (TRL)*. 2022. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022.

SILVA, Henrique Cavaliere. *O processo de desindustrialização: uma avaliação sob a perspectiva da economia brasileira (1990-2010)*. 2012. Dissertação (Mestrado em Economia) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

TEIXEIRA, L. A.; CALDARA, A.; JUNGES, M. F. Sistema de inovação integrada Vale: conectando P&D ao negócio. *Anais do 20º Simpósio de Mineração*. São Paulo, 2019.

VALE. Espaço memória. 2023. Disponível em: <https://www.vale.com/pt/espaco-memoria>. Acesso em: 06 jul. 2023.

VALENTE, M. Technology Readiness Level (TRL): conheça o framework de confiabilidade em projetos da NASA. 2021. Disponível em: <https://certi.org.br/blog/trl-desenvolvimento-projetos/>. Acesso em: 07 mai. 2024.

PROTOTIPAGEM DE IMPLANTAÇÃO DE CALCULADORA TECNOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE
NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL) NA EMPRESA VALE S/A

VIEIRA, Gabriel Fernandes. *Proposta de um modelo para avaliação do TRL em projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação*. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.