

UM MODELO DE MATURIDADE PARA CLASSIFICAÇÃO DE POLÍTICAS PÚBLICAS DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO BASEADO NA ESCALA TECHNOLOGY READINESS LEVEL

A TECHNOLOGY READINESS LEVEL-BASED MATURITY MODEL FOR
CLASSIFYING SCIENCE, TECHNOLOGY, AND INNOVATION PUBLIC POLICIES

UN MODELO DE MADUREZ PARA LA CLASIFICACIÓN DE POLÍTICAS
PÚBLICAS DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN BASADO EN LA
ESCALA TECHNOLOGY READINESS LEVEL

Marcelo Cássio Silvério¹, Marcia Cristina Bernardes Barbosa², Talysson Andrey Rocha Santos³

DOI: 10.54899/dcs.v23i94.6710

Recibido: 20/07/2026 | Aceptado: 13/08/2026 | Publicación en línea: 20/08/2026.

RESUMO

Instrumentos de avaliação tecnológica são importantes para orientar investimentos em ciência, tecnologia e inovação (CT&I), sendo o Technology Readiness Level (TRL) uma das medições utilizadas para esse propósito. Entretanto, sua aplicação concentra-se na evolução tecnológica, sem contemplar fatores institucionais e de governança que condicionam a implementação de políticas públicas. Este artigo propõe o Technology Readiness Level Adaptado (TRLa), um modelo conceitual que amplia a escala tradicional ao incorporar dimensões político-institucionais relevantes para o monitoramento e a avaliação de políticas públicas de CT&I. O modelo expande a estrutura de nove níveis do TRL, redefinindo seus critérios para integrar maturidade tecnológica, capacidade institucional, governança, gestão e implementação. A proposta contribui para reduzir lacunas na avaliação de projetos financiados com recursos públicos, subsidiando decisões de investimento, gestão de riscos e acompanhamento de resultados. O TRLa constitui uma ferramenta metodológica inovadora para fortalecer a gestão baseada em evidências e aprimorar a efetividade das políticas públicas de inovação.

Palavras-chave: Technology Readiness Level Adaptado (TRLa). Políticas Públicas de CT&I. Inovação.

ABSTRACT

Technology assessment instruments play an important role in guiding investments in Science, Technology, and Innovation (ST&I), with the Technology Readiness Level (TRL) being one of the most widely used frameworks for this purpose. However, its application is primarily focused

¹ Mestre em Gestão Pública, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

E-mail: marcelo.silverio@mcti.gov.br

² Doutora em Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: marcia.barbosa@ufrgs.br

³ Graduado em Relações Internacionais, Instituto de Educação Superior de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.

E-mail: talysson.santos@mcti.gov.br

on technological development and does not encompass the institutional and governance factors that influence the implementation of public policies. This article proposes the Adapted Technology Readiness Level (TRLa), a conceptual model that extends the traditional TRL framework by incorporating political-institutional dimensions relevant to the monitoring and evaluation of ST&I public policies. The model expands the nine-level TRL structure by redefining its criteria to integrate technological maturity, institutional capacity, governance, management, and implementation. The proposed framework helps address existing gaps in the assessment of projects financed with public resources, supporting investment decisions, risk management, and performance monitoring. The TRLa constitutes an innovative methodological tool for strengthening evidence-based management and enhancing the effectiveness of innovation public policies.

Keywords: Adapted Technology Readiness Level (TRLa). Science. Technology and Innovation (ST&I) Public Policies. Innovation.

RESUMEN

Los instrumentos de evaluación tecnológica desempeñan un papel fundamental en la orientación de las inversiones en Ciencia, Tecnología e Innovación (CTI), siendo el Technology Readiness Level (TRL) uno de los marcos más utilizados para este propósito. Sin embargo, su aplicación se centra principalmente en la evolución tecnológica, sin considerar los factores institucionales y de gobernanza que condicionan la implementación de las políticas públicas. Este artículo propone el Technology Readiness Level Adaptado (TRLa), un modelo conceptual que amplía la escala tradicional al incorporar dimensiones político-institucionales relevantes para el seguimiento y la evaluación de las políticas públicas de CTI. El modelo expande la estructura de nueve niveles del TRL, redefiniendo sus criterios para integrar la madurez tecnológica, la capacidad institucional, la gobernanza, la gestión y la implementación. La propuesta contribuye a reducir las brechas existentes en la evaluación de proyectos financiados con recursos públicos, proporcionando apoyo para la toma de decisiones de inversión, la gestión de riesgos y el seguimiento de resultados. El TRLa constituye una herramienta metodológica innovadora para fortalecer la gestión basada en evidencia y mejorar la eficacia de las políticas públicas de innovación.

Palabras clave: Technology Readiness Level Adaptado (TRLa). Políticas Públicas de Ciencia. Tecnología e Innovación (CTI). Innovación.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico contemporâneo não pode ser compreendido como um processo exclusivamente técnico ou linear (Savenhago; Pedro, 2021). Ao contrário, trata-se de um fenômeno sociotécnico complexo, no qual a evolução das tecnologias resulta da interação

entre fatores científicos, econômicos, políticos, institucionais e sociais (Oliveira, 2020). Nessa perspectiva, o avanço tecnológico é influenciado por decisões, interesses e contextos que moldam tanto a trajetória das inovações quanto sua adoção e seus impactos na sociedade (Dias, 2021).

Neste contexto, a Ciência e Tecnologia e Inovação é considerada um setor estratégico da economia, pois exerce um papel central na promoção da inovação, no crescimento socioeconômico e na competitividade nacional. Além disso, a presença de externalidades positivas e de retornos sociais superiores aos custos privados justifica a necessidade da intervenção estatal como mecanismo de correção de falhas de mercado e indução ao desenvolvimento tecnológico (Mazzucato, 2018).

Assim, as políticas públicas de incentivo à inovação tornam-se fundamentais para a criação de um ambiente dinâmico, capaz de estimular o avanço científico e tecnológico de forma sustentável e inclusiva. Um dos pilares fundamentais para um ecossistema de inovação eficiente são as políticas públicas de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I), que estruturam incentivos e diretrizes para fomentar a pesquisa e a aplicação do conhecimento científico (De Negri, 2017; De Negri, 2021).

No entanto, a crescente utilização das emendas parlamentares como instrumento de financiamento de projetos de CT&I ampliou a necessidade de mecanismos que permitam avaliar não apenas a maturidade tecnológica das inovações, mas também aspectos relacionados à capacidade institucional, à governança, ao alinhamento às prioridades governamentais e à implementação das políticas públicas.

Diante disso, este artigo tem como objetivo propor o Technology Readiness Level Adaptado (TRLa), um modelo conceitual que amplia a escala tradicional de maturidade tecnológica (TRL) para incorporar dimensões político-institucionais, de modo a subsidiar o monitoramento e a avaliação de políticas públicas brasileiras de ciência, tecnologia e inovação (CT&I).

Espera-se que o TRL Adaptado contribua para o aperfeiçoamento dos processos de monitoramento, gestão de riscos, priorização de investimentos e avaliação de resultados em políticas públicas de CT&I, oferecendo uma ferramenta metodológica capaz de aproximar os campos da inovação tecnológica e da administração pública, especialmente em um contexto de crescente utilização de instrumentos descentralizados de financiamento, como as emendas parlamentares.

REFERENCIAL TEÓRICO

O caminho da pesquisa básica até a comercialização de uma tecnologia inovadora é cheio de desafios, incertezas e riscos. A gestão eficaz da inovação exige ferramentas e métodos que auxiliem na avaliação da maturidade tecnológica, na identificação de riscos e na tomada de decisões estratégicas sobre investimentos.

Assim, a avaliação da maturidade tecnológica passou a importar na gestão da inovação. À medida que projetos científicos evoluem desde a pesquisa básica até sua aplicação comercial, aumenta a necessidade de instrumentos que permitam mensurar o estágio de desenvolvimento das tecnologias, apoiar decisões de investimento e reduzir as incertezas inerentes ao processo inovativo.

A avaliação da maturidade tecnológica de inovações e produtos tem sido uma preocupação crescente em diversas áreas do conhecimento. Entre os diversos modelos desenvolvidos para essa finalidade, destaca-se a escala de Níveis de Prontidão Tecnológica (Technology Readiness Level - TRL), proposta originalmente pela NASA na década de 1970.

O principal objetivo dessa metodologia foi estabelecer uma estrutura padronizada que permitisse avaliar e comunicar, de forma sistemática, o nível de maturidade de uma tecnologia ao longo de todo o seu processo de desenvolvimento (Mankins, 1995). Desde sua concepção, o modelo TRL vem sendo amplamente utilizado e continuamente adaptado para diferentes contextos de inovação, ampliando sua aplicação para setores como defesa, indústria, saúde e outras áreas que demandam a avaliação da evolução tecnológica.

Diferentes organizações adaptaram o TRL às suas necessidades específicas, na União Europeia, a Comissão Europeia incorporou o conceito às estratégias de inovação a partir de 2009, no contexto das Tecnologias Facilitadoras Essenciais (*Key Enabling Technologies* – KETs), propondo uma abordagem comum para avaliação da maturidade tecnológica como forma de aproximar a pesquisa do mercado (European Commission, 2009). Essa iniciativa foi consolidada no programa Horizon 2020, iniciado em 2014, que passou a utilizar oficialmente os níveis de TRL como referência para definir o estágio de desenvolvimento tecnológico esperado em chamadas de pesquisa e inovação (European Commission, 2014). (, enquanto o Departamento de Defesa dos Estados Unidos foi pioneiro em levá-lo além do universo aeroespacial da NASA, aplicando-o à aquisição de tecnologias militares.

Essas adaptações não surgem por acaso: elas acompanham um movimento mais amplo de aproximação entre ciência, tecnologia e mercado, impulsionado nos Estados Unidos pela Bayh-Dole Act de 1980, que permitiu às universidades reterem e comercializar patentes originadas de pesquisas financiadas com recursos públicos (Pires; Quintella; Godinho, 2023).

O efeito dessa legislação foi além das fronteiras americanas: no Brasil, estudos recentes mostram que as universidades já alcançaram um nível de produtividade de patentes comparável ao dos Estados Unidos quando medido em relação ao PIB, ainda que, proporcionalmente à população, essa produtividade permaneça bem menor com forte concentração em biotecnologia, produtos farmacêuticos, química e instrumentos (Pires; Quintella; Godinho, 2023). Esse conjunto de evidências reforça como escalas como o TRL precisaram evoluir para acompanhar uma realidade em que ciência, mercado e política pública estão cada vez mais entrelaçados.

Essas adaptações buscaram integrar fatores como a prontidão comercial (Commercial Readiness Level - CRL), a prontidão de manufatura (Manufacturing Readiness Level - MRL), a prontidão de sistema (System Readiness Level - SRL) e a prontidão organizacional (Organizational Readiness Level - ORL), cada um com seu foco e ampliando a aplicabilidade do modelo original (Sauser *et al.*, 2006; Azizian *et al.*, 2009; Department of Energy, 2014; Department of Defense, 2020).

Essas adaptações evidenciam que, embora o conceito original permaneça válido, diferentes contextos de aplicação exigem a incorporação de novos critérios capazes de refletir dimensões específicas do processo de inovação.

As políticas públicas de Ciência, Tecnologia e Inovação desempenham um papel na consolidação e aprimoramento do uso do TRL, especialmente ao estabelecer diretrizes para o financiamento, desenvolvimento e regulamentação de novas tecnologias. No Brasil, ações governamentais, como a Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação - ENCTI, buscam fomentar a pesquisa aplicada e incentivar a transição de tecnologias do ambiente acadêmico para o setor produtivo.

O uso do TRL como ferramenta de avaliação pode auxiliar na definição de prioridades de investimento e na alocação eficiente de recursos públicos, garantindo que inovações com maior potencial de impacto avancem para estágios mais elevados de desenvolvimento (Martin *et al.*, 2020).

Com o surgimento de mecanismos de financiamento, como as emendas parlamentares, torna-se necessário a adaptação de um modelo de TRL que integre inovação com políticas

públicas. A destinação de recursos por meio de emendas impacta diretamente a viabilidade de projetos científicos e tecnológicos, exigindo métricas que avaliem não apenas a maturidade técnica da inovação, mas também sua aderência às demandas políticas e sociais.

Assim, um TRL adaptado a esse contexto poderia incorporar dimensões como viabilidade regulatória, impacto social e alinhamento com diretrizes governamentais, permitindo uma avaliação mais integrada das iniciativas tecnológicas.

A adoção do TRL e suas variantes ressalta a importância de metodologias para a avaliação de tecnologias emergentes. No entanto, ainda há desafios a serem enfrentados quanto à sua aplicabilidade em cenários altamente dinâmicos, como os ecossistemas de inovação e as *startups* de base tecnológica.

Essa lacuna tornou-se evidente com a crescente utilização das emendas parlamentares como instrumento de financiamento de projetos de CT&I, essas emendas ampliaram a participação do Poder Legislativo na destinação de recursos públicos, modificando significativamente a dinâmica de seleção, implementação e acompanhamento dos projetos financiados. Nesse novo cenário, a viabilidade de uma inovação passa a depender simultaneamente da sua maturidade tecnológica e da capacidade institucional dos entes executores, da governança da política pública, da estabilidade orçamentária, da articulação entre os atores envolvidos e do alinhamento às prioridades governamentais.

METODOLOGIA

Este artigo tem natureza teórico-conceitual e caráter qualitativo, fundamentado em pesquisa bibliográfica e documental (Gil, 2019; Lakatos; Marconi, 2021). Optou-se pela pesquisa bibliográfica por ser o procedimento adequado à construção de modelos conceituais que buscam sistematizar e reinterpretar categorias já consolidadas na literatura, no caso, a escala Technology Readiness Level, com a utilização de fontes primárias e secundárias.

O levantamento bibliográfico abrangeu três eixos complementares: (i) a literatura fundadora e as adaptações internacionais do TRL (Mankins, 1995; Azizian *et al.*, 2009; adaptações da Comissão Europeia e do Departamento de Defesa dos Estados Unidos); (ii) a literatura brasileira sobre políticas públicas de CT&I, capacidade estatal e implementação (De Negri, 2017, 2021; Souza; Fontanelli, 2020; Lipsky, 2010; Zacka, 2017); e (iii) documentos normativos e institucionais brasileiros relacionados ao financiamento e à governança da inovação

- a Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (ENCTI), manuais operacionais de agências de fomento (FINEP, EMBRAPPI) e normativos sobre emendas parlamentares.

A construção do TRLa seguiu um procedimento de análise comparativa e reinterpretação: cada um dos nove níveis da escala TRL original foi confrontado com a literatura sobre capacidade institucional e implementação de políticas públicas, buscando identificar, para cada estágio, um critério equivalente de natureza político-institucional que pudesse coexistir com o critério tecnológico original.

Desse processo resultaram os cinco princípios metodológicos apresentados no artigo, a preservação da estrutura original, a substituição do foco exclusivamente tecnológico, a incorporação de fatores institucionais, a integração entre maturidade tecnológica e gestão pública, e a aplicabilidade a políticas financiadas com recursos públicos, formulados a partir da articulação teórica entre a literatura de avaliação tecnológica (TRL) e a literatura de capacidade estatal e implementação de políticas públicas.

Trata-se, portanto, de uma análise baseada na triangulação de documentos normativos, estudos de caso institucionais e literatura científica, de modo a garantir consistência e aplicabilidade à proposta do TRLa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia de avaliação da prontidão tecnológica (Technology Readiness Assessment - TRA), desenvolvida na década de 1980 pela Agência Espacial Norte Americana (National Aeronautics and Space Administration - NASA), é representada pela escala do nível de prontidão tecnológica (Technology Readiness Level - TRL), que permite atribuir a maturidade das tecnologias (Mankins, 2009).

A escala TRL (Technology Readiness Level) surge como um instrumento para orientar o processo de desenvolvimento tecnológico, facilitando a comunicação entre as partes interessadas, a gestão de riscos e as decisões de financiamento (Bergamini, 2021, Velho, 2017).

Figura 1. Os 9 Níveis da Escala TRL

Os 9 Níveis da Escala TRL	
Nível	Definição
TRL 1	Princípios básicos observados e reportados. Representa a fase de ideação, onde ideias e conceitos básicos são formulados
TRL 2	Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada. Nesta fase, chamada conceitual, as aplicações da tecnologia são propostas e os parâmetros de desempenho são definidos de forma geral.
TRL 3	Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica e experimental. A fase de prova de conceito envolve a realização de testes em laboratório para validar as funções críticas da tecnologia.
TRL 4	Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais básicos de laboratório. Aqui ocorre a otimização da tecnologia em ambiente laboratorial, com testes de desempenho e validação de componentes.
TRL 5	Validação em ambiente relevante da função crítica do produto. Prototipagem em escala reduzida para validação da tecnologia em um ambiente relevante, simulando condições reais.
TRL 6	Protótipo em escala de engenharia mostrando desempenho em ambiente relevante. Escalonamento da tecnologia, com a criação de um protótipo em escala real e testes em ambiente operacional.
TRL 7	Sistema prototípico similar em escala completa demonstrado em ambiente relevante. Demonstração em ambiente de produção, com a tecnologia operando em um ambiente real.
TRL 8	Sistema real completo e aceito para aplicação. A tecnologia está pronta para produção em escala comercial, com todos os testes e validações concluídos.
TRL 9	Sistema real demonstrado na aplicação por meio de operações com missão bem-sucedida. A tecnologia está em produção continuada, com pleno funcionamento em ambiente real e sucesso comprovado.
Quadro de níveis do TRL. Elaboração dos autores	

Fonte: Mankins,1995.

A evolução da maturidade tecnológica ocorre à medida que níveis mais elevados são atingidos dentro da escala de Technology Readiness Levels (TRLs). Nesse sentido, um TRL 2 representa um grau de maturidade superior ao TRL 1.

Além disso, é fundamental destacar que a progressão entre os níveis de maturidade não ocorre automaticamente. Para que um determinado nível seja efetivamente considerado alcançado, é imprescindível que todas as suas etapas sejam rigorosamente validadas e concluídas. Por exemplo, um produto ou serviço que atinge o TRL 5 não avança imediatamente para o TRL 6 ao término das atividades do nível anterior. Somente após a finalização das experimentações e a devida comprovação, por meio de relatórios técnicos e testes específicos, o nível 6 será oficialmente reconhecido.

O uso do TRL se difundiu amplamente em diversos setores e organizações, incluindo empresas, universidades, agências de fomento e instituições governamentais. No Brasil, a norma Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization, em inglês) ISO que define o TRL é a ABNT NBR ISO 16290:2015. Ela foi adaptada da norma

internacional ISO 16290:2013, que trata da definição do Nível de Maturidade Tecnológica (TRL) e seus critérios de avaliação, inicialmente para sistemas espaciais (ABNT, 2015).

Apesar de sua origem no setor espacial, a norma ABNT NBR ISO 16290:2015 pode ser aplicada em diversas áreas do desenvolvimento de tecnologia e inovação no Brasil.

A escala TRL pode ser utilizada para selecionar projetos de pesquisa e desenvolvimento, para informar e balizar decisões de gestão e apoio, assim como fornecer uma métrica comum para avaliar a maturidade de uma tecnologia, facilitar o entendimento entre gestores, equipes internas e parceiros externos, identificar os esforços e recursos necessários para o desenvolvimento de uma tecnologia, gerenciar riscos e tomar decisões sobre investimentos, prever o lançamento de uma tecnologia no mercado, definir o escopo, prazos e recursos para cada nível de maturidade tecnológica, executar benchmarking e avaliar o desempenho de projetos, auxiliar na identificação de oportunidades de negócios e transferência de tecnologia.

Alguns autores, como Azizian, 2009, apontam algumas limitações na utilização do TRL como a subjetividade na avaliação, dificuldade de aplicação em setores com baixa maturidade, o foco na tecnologia e não no produto final, a relação custo e risco não bem definida, e a imprecisão na definição dos níveis. Apesar dessas limitações, o TRL se tornou uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar a maturidade tecnológica, auxiliando na tomada de decisões estratégicas e no desenvolvimento de tecnologias inovadoras.

No contexto brasileiro, diversas agências governamentais brasileiras utilizam o TRL como ferramenta para a gestão da inovação e o fomento ao desenvolvimento tecnológico.

Figura 2. Principais Atores do Sistema Nacional de CT&I



Fonte: ENCTI 2016-2022

Tais como a EMBRAPPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial) utiliza o TRL como um dos critérios para a seleção de projetos a serem financiados, a empresa foca em projetos na fase pré-competitiva, com TRLs entre 3 e 6, visando a estimular a inovação na indústria. O Manual de Operação da EMBRAPPII define o TRL e sua aplicação na avaliação de projetos.

CAPDA (Comitê das Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia), A Resolução nº 13/2016 do CAPDA estabelece o uso da escala TRL como critério para a seleção de projetos de pesquisa e desenvolvimento com potencial mercadológico.

O Ministério da Defesa, por meio de estudos conduzidos pelo CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos), utiliza o TRL para analisar a maturidade de projetos estratégicos, visando minimizar riscos e estimar recursos.

FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), importante agência de fomento à inovação no Brasil, utiliza o TRL em seus programas de financiamento, direcionando recursos para projetos com diferentes níveis de maturidade tecnológica.

NDES Funtec (Fundo Tecnológico do BNDES), fundo de investimento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) voltado para o apoio à inovação, também utiliza o TRL como critério para a seleção de projetos.

INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial, responsável pela concessão de patentes no Brasil, utiliza o TRL na Resolução nº 191/2017, que institui o projeto piloto de priorização do exame de pedidos de patentes de instituições de ciência e tecnologia.

Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), instituição de pesquisa agropecuária, adaptou a escala TRL à sua realidade, criando um manual com exemplos de aplicações.

A crescente adoção do TRL por agências governamentais brasileiras demonstra a importância dessa ferramenta para a gestão da inovação no país. Ao realizar uma avaliação de maturidade precisa e no momento certo, governos e empresas podem produzir produtos mais econômicos, de melhor qualidade e com prazos mais curtos, eliminando as lacunas de conhecimento em decisões cruciais. (Azizian *et al.*, 2009).

A escala TRL, como discutimos anteriormente, é uma ferramenta importante para avaliar a maturidade de uma tecnologia, e essa maturidade está ligada ao conceito de "Vale da Morte" em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

Os Modelos Linear e Tripla-Hélice

A forma como o avanço científico se converte em inovação no mercado tem sido explicada, em grande parte, pelo chamado Modelo Linear de Inovação (Kline; Rosenberg, 1986; Stokes, 2009; Rodrigues, 2018). Neste Modelo, supõe-se que exista uma relação praticamente direta entre os resultados da pesquisa e desenvolvimento e sua absorção pelas empresas, seja na forma de novos processos produtivos, seja na criação de novos produtos (Castelli; Conceição, 2024).

Assim, haveria uma sequência de estágios na pesquisa básica, realizada em laboratórios, universidades e institutos de pesquisas, local em que geraria o conhecimento científico. Em seguida esse conhecimento seria consolidado por meio da pesquisa aplicada e depois testada em desenvolvimento experimental (Giolo Junior; Saraiva, 2022).

Apesar das críticas que recebe há décadas, esse modelo ainda molda de maneira significativa as políticas públicas de ciência, tecnologia e inovação, além de orientar o modo como universidades, institutos de pesquisa e empresas constroem suas parcerias.

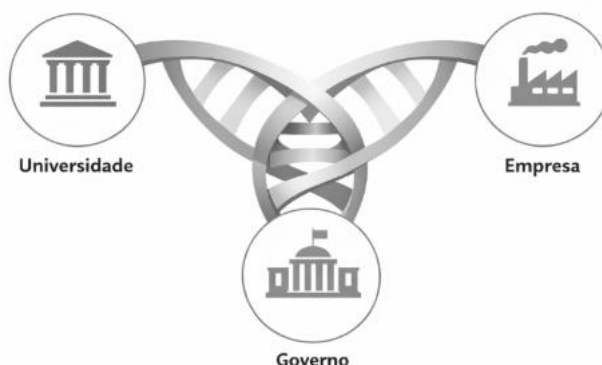
Figura 3. O Modelo linear pesquisa-mercado



Fonte: Stokes (2009)

Percebe-se, nas últimas décadas, uma guinada das políticas públicas brasileiras em direção ao modelo da Tripla-Hélice (ou espiral de inovação). A representação sugere o surgimento de parcerias que envolvem a cooperação entre universidade, indústria e governo, considerando interações recíprocas em diferentes estágios do processo de geração e disseminação do conhecimento científico e tecnológico (Etzkowitz; Leydersdorff, 2000 apud Gaban, 2020).

Figura 4. Modelo da Tripla-Hélice



Fonte: Autores 2026.

A implementação de políticas públicas no Brasil enfrenta uma série de desafios complexos. Podemos citar como parte dessa problemática as emendas parlamentares que são um mecanismo que permite ao legislativo modificar o orçamento proposto pelo executivo. A crítica principal reside no fato de que, em vez de atenderem a critérios técnicos e necessidades sociais, as emendas tendem a ser utilizadas para fins eleitoreiros e para atender a interesses locais (Almeida, 2021).

Pode-se pontuar também a atuação dos “burocratas de nível de rua” que ocupam posições-chave na implementação de políticas públicas, atuando como elo entre o Estado e a sociedade. A natureza complexa do trabalho exige que os burocratas de nível de rua tomem decisões com base em sua interpretação das normas e na avaliação das circunstâncias específicas de cada caso, moldando a política transformando objetivos originais das políticas em ações concretas que podem, ou não, gerar resultados desejados pela política (Lipsky, 2010; Zacka, 2017).

Segundo essa abordagem, a atuação dos “burocratas de nível de rua” não se limita à execução mecânica de políticas previamente definidas, mas envolve escolhas, adaptações e interpretações condicionadas por fatores como restrições institucionais, disponibilidade de recursos, pressões organizacionais e características do público atendido. Dessa forma, tais agentes desempenham papel central na produção dos resultados efetivos das políticas públicas, uma vez que suas decisões influenciam diretamente a forma como os serviços são entregues à sociedade.

A natureza flexível do TRL permite sua customização para atender às necessidades específicas de diferentes setores e contextos, a adaptação do TRL para avaliação de políticas públicas de CT&I pode envolver os seguintes passos:

1. Definir o objetivo da avaliação: qual aspecto da política pública se deseja avaliar com o TRL? Por exemplo, avaliar a maturidade das tecnologias apoiadas pela política, e a capacidade da política de impulsionar a inovação.
2. Selecionar os níveis de TRL relevantes: nem todos os níveis da escala original são necessariamente relevantes para a avaliação de políticas públicas. É preciso selecionar os níveis que melhor representam as etapas de desenvolvimento que a política visa apoiar.
3. deve ser documentado e seguir critérios claros e predefinidos, a fim de garantir a imparcialidade e a confiabilidade dos resultados.

Ao adaptar o TRL para a avaliação de políticas públicas, é fundamental considerar o contexto específico da política e do setor avaliado, a disponibilidade de dados e informações para a avaliação, a necessidade de realizar ajustes e refinamentos à medida que a política é implementada, a importância de envolver especialistas e stakeholders no processo de adaptação e avaliação.

O TRL adaptado pode ser uma ferramenta para o acompanhamento, a gestão e o aprimoramento de políticas públicas, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e para o crescimento econômico e social, a construção do TRLa partiu do pressuposto de que a lógica evolutiva do TRL permanece válida para políticas públicas, desde que seus critérios de avaliação sejam reinterpretados à luz das especificidades da gestão pública.

Dessa forma, optou-se por preservar a estrutura composta por nove níveis de maturidade, mantendo a progressão crescente da escala, porém redefinindo os critérios de avaliação para refletir não apenas a evolução tecnológica, mas também a evolução da política pública responsável por sua implementação, a adaptação fundamentou-se em cinco princípios metodológicos:

- a) Preservação da estrutura original do TRL, os nove níveis de maturidade foram mantidos para assegurar compatibilidade conceitual com a metodologia internacional e facilitar sua compreensão por pesquisadores, gestores e instituições de fomento.
- b) Substituição do foco exclusivamente tecnológico por uma abordagem político-tecnológica, a avaliação deixa de considerar apenas a evolução da tecnologia e passa a incorporar elementos relacionados à formulação, implementação, governança e consolidação das políticas públicas que apoiam seu desenvolvimento.
- c) Incorporação de fatores institucionais, foram incluídos aspectos relacionados à capacidade administrativa dos entes executores, coordenação institucional, estabilidade normativa,

mecanismos de monitoramento, transparência e prestação de contas, reconhecendo que esses fatores influenciam diretamente o sucesso da inovação financiada com recursos públicos.

- d) Integração entre maturidade tecnológica e gestão pública, cada nível do TRLa foi estruturado para representar a evolução simultânea da tecnologia e da política pública, permitindo avaliar em que medida ambas avançam de forma coordenada ao longo do ciclo de implementação.
- e) Aplicabilidade às políticas públicas de CT&I financiadas por recursos públicos, o modelo foi concebido para apoiar processos de seleção, acompanhamento, monitoramento e avaliação de projetos financiados por instrumentos.

Assim, de acordo com os parâmetros apresentados anteriormente podemos adaptar a escala de TRL para a avaliação de políticas públicas de CT&I, da seguinte forma:

Tabela 1. Os 10 Níveis do TRL Adaptado

TRL Adaptado	
Nível	Definição
TRLa 0	Etapa preliminar da maturidade tecnológica, caracterizada pela identificação de uma necessidade ou oportunidade e pela definição do problema, antes do início da investigação dos princípios científicos da tecnologia.
TRLa 1 a 3	Identificação do problema público e definição dos objetivos e do arcabouço institucional que vão sustentar a política.
TRLa 4 a 5	Início da operacionalização, com o desenvolvimento de soluções práticas e o fortalecimento de parcerias entre universidades, empresas e governo.
TRLa 6	Execução prática de projetos e intervenções que geram novos conhecimentos, produtos ou modelos para o sistema de CT&I.
TRLa 7	Aplicação em larga escala das soluções já testadas, comprovando sua viabilidade e impacto em ambiente real.
TRLa 8	Integração plena da solução no ambiente operacional, encerrando o ciclo de desenvolvimento.
TRLa 9	Política ou tecnologia validada cientificamente, testada em condições reais e amparada por evidências sólidas de eficácia.

Fonte: Autores, 2026.

O TRL 0 corresponde a uma etapa anterior ao início da pesquisa científica propriamente dita, caracterizada pela identificação de uma necessidade, desafio ou oportunidade que justifique o desenvolvimento de uma solução tecnológica. Nesse estágio, ainda não foram investigados os princípios científicos que darão sustentação à tecnologia, nem existem evidências experimentais ou conceituais que permitam caracterizar o início de seu desenvolvimento.

Os níveis iniciais (TRLa 1 a TRLa 3) correspondem à formulação conceitual da política pública, envolvendo identificação do problema, definição de objetivos, construção do marco normativo e planejamento das ações estratégicas.

Os níveis intermediários (TRLa 4 a TRLa 6) representam a implementação da política pública, caracterizada pela execução dos projetos, articulação institucional, operacionalização dos instrumentos de financiamento e consolidação dos mecanismos de acompanhamento e gestão.

Os níveis superiores (TRLa 7 a TRLa 9) correspondem à demonstração dos resultados em ambiente operacional, institucionalização da política pública, disseminação das soluções implementadas e comprovação dos impactos gerados sobre o sistema nacional de ciência, tecnologia e inovação.

A expansão da estrutura hierárquica do TRL possibilita que pesquisadores e gestores utilizem uma linguagem já consolidada internacionalmente, enquanto os novos critérios permitem avaliar dimensões que tradicionalmente não são contempladas pelos modelos de maturidade tecnológica.

O uso do TRLa, poderá gerar um impacto significativo tanto na gestão de riscos quanto nas decisões de financiamento para o desenvolvimento tecnológico. Isso se deve à capacidade do TRLa de fornecer uma visão estruturada e padronizada da maturidade da tecnologia, permitindo a identificação e a quantificação dos riscos e a tomada de decisões mais assertivas sobre investimentos.

O TRLa pode influenciar diretamente as decisões de financiamento, fornecendo às agências de fomento e aos gestores públicos uma base objetiva para avaliar o potencial de retorno científico e tecnológico, bem como os riscos associados ao apoio a determinada tecnologia. Além disso, auxilia na definição de critérios de elegibilidade para editais e programas de fomento, contribuindo para que os recursos públicos sejam direcionados a projetos com maior probabilidade de sucesso.

É na avaliação de risco, no entanto, que se revela um dos pontos mais críticos do processo de inovação: a transição entre os estágios intermediários da escala TRL, período em que muitas tecnologias promissoras simplesmente não sobrevivem. Esse fenômeno é conhecido como "Vale da Morte" uma metáfora amplamente utilizada para descrever o desafio de transformar descobertas científicas e protótipos inovadores em produtos comercialmente viáveis.

O termo capta bem a natureza do problema: são justamente as tecnologias que já superaram a fase de validação em laboratório (TRL 4), mas que ainda precisam ser prototipadas,

testadas em ambiente relevante e escaladas para produção (TRL 5 a 7), as mais vulneráveis a barreiras financeiras, técnicas e organizacionais capazes de interromper seu avanço antes de chegarem ao mercado.

Experiências internacionais mostram como diferentes países têm buscado enfrentar esse gargalo por meio de instrumentos de financiamento específicos para essa faixa intermediária da escala TRL. Na União Europeia, por exemplo, o SME Instrument - atualmente incorporado ao European Innovation Council (EIC) Accelerator, no âmbito do programa Horizonte Europa - destina subvenções de até 2,5 milhões de euros a pequenas e médias empresas que já validaram suas tecnologias em ambiente laboratorial e precisam avançar rumo à demonstração e à validação em ambiente relevante, etapas que correspondem aproximadamente aos níveis TRL 4 a 7 (Mina *et al.*, 2021).

O instrumento reconhece, na prática, que é justamente nesse intervalo que o financiamento tradicional de pesquisa básica se torna insuficiente e o capital privado ainda considera o risco elevado demais para investir, evidenciando como a travessia do "Vale da Morte" tem sido tratada como um problema de desenho de política pública, e não apenas como uma etapa natural do processo de inovação (Mina *et al.*, 2021).

A aplicação do TRLa consiste na identificação do estágio de maturidade de uma política pública ou de um projeto de CT&I mediante análise das evidências existentes para cada nível da escala.

A avaliação deve considerar documentos normativos, instrumentos de planejamento, relatórios técnicos, indicadores de execução, mecanismos de governança, evidências de implementação, resultados alcançados e demonstrações de impacto.

Assim como ocorre no TRL tradicional, a evolução entre os níveis somente deverá ocorrer quando os critérios definidos para o estágio anterior estiverem plenamente atendidos. Essa característica preserva a natureza incremental da metodologia e reduz a subjetividade da avaliação, proporcionando maior confiabilidade aos processos de monitoramento, gestão de riscos e tomada de decisão.

A adoção do TRLa amplia a capacidade analítica dos instrumentos de avaliação de políticas públicas ao integrar, em uma única estrutura metodológica, a evolução tecnológica, a capacidade institucional, a governança e a efetividade das ações governamentais. Dessa forma, o modelo proposto oferece uma ferramenta capaz de subsidiar decisões de financiamento,

aperfeiçoar mecanismos de acompanhamento e fortalecer a gestão baseada em evidências no âmbito das políticas públicas de CT&I.

CONCLUSÃO

O TRLa evidencia que a maturidade tecnológica e a maturidade político-institucional evoluem de forma interdependente, porém não necessariamente coincidentes. Enquanto o TRL tradicional, desenvolvido pela NASA, tem na incerteza tecnológica seu único fator limitante, a contribuição do modelo consiste em reconhecer que a evolução de uma inovação tecnológica não ocorre de forma isolada, mas depende de um ambiente institucional capaz de oferecer estabilidade regulatória, continuidade administrativa, capacidade de gestão e mecanismos adequados de financiamento, como mudanças de governo, contingenciamentos orçamentários ou substituição de equipes técnicas.

Essa constatação alinha-se com a literatura sobre capacidades estatais, que atribui a sustentação de políticas públicas ao longo do tempo à existência de burocracias competentes, profissionalizadas e dotadas de recursos organizacionais e financeiros estáveis (Souza; Fontanelli, 2020). O caso das emendas parlamentares, apontado neste artigo, ilustra bem essa tensão: trata-se de um instrumento que amplia significativamente o volume de recursos disponíveis para projetos de CT&I, mas cuja efetividade real depende de algo que nenhum edital consegue garantir por si só, a capacidade administrativa dos entes beneficiários e a continuidade das prioridades governamentais ao longo do tempo.

Nesse sentido, a principal contribuição do TRLa está em oferecer uma estrutura analítica capaz de tornar visível essa dimensão institucional, hoje invisibilizada pelos modelos de maturidade estritamente tecnológicos. Ao integrar critérios técnicos e político-administrativos em uma escala única, o modelo reduz assimetrias de informação entre gestores, pesquisadores, agências de fomento e órgãos de controle, oferecendo parâmetros mais consistentes para priorização de investimentos e gestão de riscos em políticas públicas de CT&I.

Como toda proposta teórica inicial, o TRLa apresenta limitações que devem ser reconhecidas. Trata-se de um modelo ainda não submetido a validação empírica sistemática, e sua aplicabilidade pode variar conforme o tipo de política, o setor tecnológico e o instrumento de financiamento envolvido. Pesquisas futuras poderão testar o modelo em estudos de caso específicos, como os projetos financiados por emendas parlamentares mencionados neste

artigo, e avaliar sua capacidade preditiva em diferentes arranjos institucionais, contribuindo para seu refinamento e para a consolidação de escalas de maturidade híbridas no campo das políticas públicas de CT&I.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Dayson Pereira Bezerra de. O mito da ineficiência alocativa das emendas parlamentares. *Revista Brasileira de Ciência Política*, n. 34, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-3352.2021.34.239518>. Acesso em: 10/01/2025.

ANTENOR, Gisele Aparecida Chaves. *A Relação Entre Maturidade Científica e Tecnológica (TRL) e Mecanismos de Aprendizagem, Colaboração e Transferência de Tecnologia em Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento*. Universidade Estadual do Ceará. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 16290: definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISA E INOVAÇÃO INDUSTRIAL - EMBRAPII. Relatório 1º Semestre de 2014. Contrato de Gestão EMBRAPII/MCTI. Disponível em: <http://embrapii.org.br/sobre/Embrapii_Relatorio_Semestral_1_2014>. Acesso em: 04 out 2024.

AZIZIAN, Nazanin *et al.* A Comprehensive Review and Analysis of Maturity Assessment Approaches for Improved Decision Support to Achieve Efficient Defense Acquisition. Disponível em: <http://www.iaeng.org/publication/WCECS2009/WCECS2009_pp1150-1157.pdf>. Acessado em: 06 ago. 2024.

BERGAMINI, R. L. Avaliação do Nível de Maturidade de Tecnologia (TRL) nas Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs) com o modelo adaptado da AFRL – Air Force Research Laboratory. *Revista de Administração de Roraima - RARR*, v. 10, 12 maio 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). *Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2016–2022: sumário executivo*. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2018.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Resolução INPI nº 191, de 19 de maio de 2017. Institui o Projeto Piloto de Patentes de Invenção com Tecnologias Resultantes de Instituições de Ciência e Tecnologia – Patentes ICTs. Rio de Janeiro: INPI, 2017.

CASTELLI, Jonattan Rodriguez; CONCEIÇÃO, Octavio Augusto Camargo. Discurso sistêmico, prática linear: a Política de Inovação brasileira de 2003 a 2014. *Revista Economia Política do Desenvolvimento*, Maceió, v. 15, n. 33, p. 48-76, jan./jun. 2024.

COSTA, I. M. P.; LEITE, H. J. D. Nível de Maturidade Tecnológica (NMT) aplicado às tecnologias em saúde. In: BRASIL. Avanços, Desafios e Oportunidades no Complexo Industrial da Saúde em Serviços Tecnológicos. Brasília, DF: Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento do Complexo Industrial e Inovação em Saúde, 2017.

DANTAS, Flaviano Costa. OPTIMUS: metodologia de gestão da inovação para instituições científicas e tecnológicas públicas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte. 2020.

DE NEGRI, Fernanda. Políticas públicas para ciência e tecnologia no Brasil: cenário e evolução recente. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2021. (Nota Técnica, n. 92, Diset). DOI: 10.38116/ntdiset92.

DE NEGRI, Fernanda. Por uma nova geração de políticas de inovação no Brasil. In: TURCHI, Lenita Maria; MORAIS, José Mauro de (orgs.). Políticas de apoio à inovação tecnológica no Brasil: avanços recentes, limitações e propostas de ações. Brasília: Ipea, 2017. p. 25-46.

DIAS, R. Tecnologia e poder: uma interpretação da tecnologia como elemento fundamentalmente político. Revista Tecnologia e Sociedade, Curitiba, v. 17, n. 46, p. 55-72, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. Horizon 2020 – Work Programme 2014–2015: General Annex G – Technology Readiness Levels (TRL). Brussels: European Commission, 2013.

EUROPEAN COMMISSION. Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU. Brussels: European Commission, 2009. COM (2009) 512 final.

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS – FINEP. Política operacional 2012-2014. Rio de Janeiro: 2012. Disponível em: <http://download.finep.gov.br/politicaOperacional/politica_operacional_completa2012_2014.pdf>.

GABAN, Nayara de Cássia. INFORMAÇÃO PARA INOVAÇÃO: uma análise das produções científicas sobre Technology Readness Level (TRL) e a contribuição brasileira frente a atuação dos Núcleos de Inovação Tecnológica das ICTs. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo. 2020.

GAO - United States, Government Accountability Office. Best Practices: Better Management of Technology Development Can Improve Weapon System Outcomes. Washington, DC, USA. 1999. Disponível em: <https://www.gao.gov/assets/160/156673.pdf>

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019

GIOLO JUNIOR, Cildo; SARAIVA, José Sérgio. A adoção teoria da tríplice hélice como política pública. Revista Direito UFMS, Campo Grande, v. 8, ed. especial, p. 425-443, 2022.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. Fundamentos de metodologia científica. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

LIPSKY, Michael. 2010. Street-Level Bureaucracy: Dilemmas of the Individual in Public Services. Expanded ed. New York: Russell Sage Foundation.

MANKINS, J.C. Technology Readiness Levels. A white paper. NASA. Office of Space Access and Technology. 6 apr. 1995.

MARTIN, A. R., Carvalho, S. M. S., Cunha, J. C., & Lopes, A. C. C. (2020). Classificação dos Instrumentos de Captação de Recursos para Apoio à Inovação do Governo Federal na Escala de Prontidão Tecnológica (TRL). Cadernos de Prospecção, 13(1), 78-78. <https://doi.org/10.9771/cp.v13i1.32726>

MAZZUCATO, M. O Estado Empreendedor: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado. São Paulo: Companhia das Letras, 2018.

MINA, Andrea; DI MININ, Alberto; MARTELLI, Irene; TESTA, Giuseppina; SANTOLERI, Pietro. Public funding of innovation: exploring applications and allocations of the European SME Instrument. Research Policy, v. 50, n. 1, 104131, 2021. Publicado online em 16 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.104131>.

OLECHOWSKI, A. L.; EPPINGER, S. D.; JOGLEKAR, N.; TOMASCHEK, K. Technology readiness levels: shortcomings and improvement opportunities. Systems Engineering, v. 23, n. 4, p. 395-408, 2020.

OLIVEIRA, L. V. Ciência-tecnologia-sociedade: dos fundamentos histórico-ontológicos aos princípios analíticos. Revista Tecnologia e Sociedade, Curitiba, v. 16, n. 42, p. 1-21, 2020.

PIRES, Edilson Araújo; QUINTELLA, Cristina M.; GODINHO, Manuel Mira. Patentes acadêmicas no Brasil: evolução, especialização tecnológica e implicações econômicas. Revista Observatório de la Economía Latinoamericana, Curitiba, v. 21, n. 7, p. 5981-6015, 2023.

RODRIGUES, Márcia Carolina Araújo. Financiamento da Inovação e Mudança Tecnológica: Os impactos da Subvenção Econômica na Maturidade Tecnológica de Projetos de PD&I. Universidade Estadual do Ceará. Ceará. 2018.

SALAZAR, G.; RUSSI-VIGOYA, M. N. Technology Readiness Level as the foundation of Human Readiness Level. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, v. 31, n. 6, 2021.

SAUSER, Brian; VERMA, Dinesh; RAMIREZ-MARQUEZ, Jose; GOVE, Ryan. From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels. In: CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING RESEARCH (CSER), 2006, Los Angeles, California. Proceedings... Los Angeles: CSER, 2006. Paper 126.

SAVENHAGO, I. J. S.; PEDRO, W. J. A. Considerações sobre a construção social de tecnologia. Revista Tecnologia e Sociedade, Curitiba, v. 17, n. 47, p. 219-233, 2021.

SOUZA, Celina; FONTANELLI, Flavio. Capacidade estatal e burocrática: sobre conceitos, dimensões e medidas. In: MELLO, Janine; RIBEIRO, Vanda Mendes; LOTTA, Gabriela; BONAMINO, Alícia V.; CARVALHO, Cynthia Paes de (org.). Implementação de políticas e atuação de gestores públicos: experiências recentes das políticas de redução das desigualdades. Brasília: Ipea, 2020. p. 45-71.

UNITED STATES. Department of Defense. Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook. Version 2020. Washington, DC: DoD, 2020.

UNITED STATES. Department of Energy. *Technology Commercialization Fund: Technology Readiness Assessment Guide*. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2014.

VELHO, K. *et al.* Nível de Maturidade Tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/330170870_Nivel_de_Maturidade_Tecnologica_um_a_sistematica_para_ordenar_tecnologias>. Acesso em: 7 nov. 2024.

ZACKA, B. *When the State Meets the Street: Public Service and Moral Agency*. Harvard University Press. 2017.