

## A importância de práticas de verificação e validação no processo de avaliação de métricas de maturidade

JESUS, G. <sup>1</sup>, CHAGAS JR., M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais -CSE.

gabriel.jesus@inpe.br

**Resumo.** *Integração de sistemas se tornou uma capacidade essencial para organizações que lidam com produtos e sistemas complexos. A escala de níveis de maturidade tecnológica é utilizada há décadas para auxiliar a tomada de decisão em relação à utilização de tecnologias no desenvolvimento de sistemas complexos, porém não reflete bem a integração entre tecnologias de um sistema. A escala de níveis de maturidade de integração tem sido elaborada na última década para suprir esta lacuna. O objetivo da pesquisa é analisar a importância de práticas de verificação e validação no processo de avaliação de métricas de maturidade. Através de pesquisa bibliográfica, foram analisadas metodologias de avaliação de métricas de maturidade e como são apoiadas por práticas de verificação e validação.*

**Palavras-chave:** Integration readiness level; Technology Readiness Level; Verificação e validação.

### 1. Introdução

Integração de sistemas se tornou uma capacidade essencial [Hobday, Davies, and Prencipe, 2005] para organizações modernas que lidam com Produtos e Sistemas Complexos (CoPS) [Hobday, 1998]. Engenharia de sistemas e gerenciamento de projetos são disciplinas necessárias para coordenar o esforço técnico e organizacional para integração de sistemas [Eisner, 2008].

A escala de níveis de maturidade tecnológica (TRL) foi desenvolvida para auxiliar a tomada de decisão em relação à utilização de tecnologias no desenvolvimento de sistemas complexos [Mankins, 1995]. Embora esta escala tenha sido utilizada por décadas, ela não reflete bem a integração entre tecnologias de um sistema [Olechowski, Eppinger, and Joglekar, 2015].

A escala de níveis de maturidade de integração (IRL) foi proposta para representar a maturidade da integração entre elementos de um sistema [Sausser, Verma, Ramirez-Marquez, and Gove, 2006]. Esta escala tem evoluído ao longo da última década, sendo que as melhorias mais recentes foram publicadas por Austin e York [2015, 2016].

De acordo com Mankins [2009], os desafios para efetiva utilização de escala de maturidade tecnológica são: fazer uma avaliação objetiva e bem documentada da maturidade e riscos da tecnologia em questão, além de realizar a avaliação em pontos críticos de tomada de decisão ao longo do ciclo de vida do desenvolvimento de um sistema complexo. Mankins [2009] propõe o conceito de Technology Readiness Assessment (TRA), ou avaliação de maturidade tecnológica, como metodologia utilizada

para realizar o processo de avaliação de níveis TRL. Para Mankins [2009], um TRA rigoroso deve incluir evidências claras de que o TRL declarado foi alcançado - como fotos de uma maquete no laboratório, dados quantitativos de testes de verificação, entre outras evidências.

Esta pesquisa analisa metodologias de avaliação de métricas de maturidade, a fim de avaliar como são apoiadas por práticas de verificação e validação.

## **2. Metodologia**

A metodologia de pesquisa foi baseada na pesquisa bibliográfica com caráter qualitativo sobre o objetivo proposto.

## **3. Resultados e Discussão**

As principais metodologias utilizadas para avaliar TRL têm sido análise qualitativa entre especialistas para estabelecer o nível adequado de TRL e análise através de entrevistas estruturadas acompanhadas de métodos quantitativos [Hueter and Tyson, 2010]. Algumas pesquisas elaboram estes métodos quantitativos através de probabilidade e estatística [Ristinen, 2010].

Air Force Research Laboratory (AFRL) desenvolveu uma ferramenta automatizada [Nolte, Kennedy, and Dziegiel, 2003] para estruturar a entrevista de avaliação de TRL e quantificar o nível de TRL mais adequado às respostas. O questionário traz perguntas relativas ao nível de conhecimento sobre a tecnologia e sobre o cliente da tecnologia, documentação do programa de desenvolvimento, aspectos futuros de integração, modelagem e simulação, verificação e ambiente do sistema onde a tecnologia será inserida. A principal aplicação da escala TRL neste caso é orientar a transição entre programas de desenvolvimento tecnológico para utilização em sistemas operacionais.

De maneira similar a AFRL, Jet Propulsion Laboratory (JPL) desenvolveu um processo de TRA [Frerking and Beauchamp, 2016] baseado nas recomendações da NASA. Este processo contém um questionário baseado no questionário proposto por Bilbro [2009].

Cornford e Sarsfield [2004] argumentam que as técnicas de avaliação do TRL daquele momento eram altamente qualitativas e que a importância da linguagem e da cultura envolvidas no processo de transferência de tecnologias entre os laboratórios e sua inserção em sistemas espaciais era geralmente subestimada. Nesta argumentação, as avaliações eram subjetivas devido a fatores como: a equipe que realiza a avaliação normalmente era a mesma equipe de desenvolvimento e não uma terceira parte com visão mais imparcial; as definições originais da escala TRL podiam ser interpretadas de distintas maneiras; mesmo que métodos quantitativos fossem utilizados, a base de dados continuava subjetiva devido a falhas na objetividade nas definições da escala TRL.

Uma lista de informações de suporte para cada nível TRL foi desenvolvida pelo DoD [2011] a fim de tornar a avaliação mais objetiva, contendo informações relativas à engenharia de sistemas, verificação, requisitos e particularidades técnicas pertinentes a cada nível TRL.

A norma ISO 16290:2013, e sua tradução pela ABNT [2015], apresentam uma lista com o trabalho realizado e documentado como evidências necessárias para alcançar cada nível TRL. Esta lista de evidências, apresentada na Tabela 1, é constituída por elementos de definição da tecnologia, requisitos de desempenho, e elementos de verificação de sistemas espaciais [ECSS, 2017]. Os elementos relacionados à verificação e validação se encontram sublinhados na Tabela 1.

**Tabela 1. Escala de níveis de maturidade tecnológica. [ABNT, 2015]**

Nível de maturidade da tecnologia	Marco alcançado pelo elemento	Trabalho realizado (documentado)
TRL 1: Princípios de base observados e relatados	Aplicações potenciais são identificadas após observações de base, mas o conceito do elemento ainda não está formulado.	Expressão dos princípios de base previstos para uso.  Identificação de potenciais aplicações.
TRL 2: Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulados	Formulação de potenciais aplicações e conceito preliminar do elemento. Nenhuma prova de conceito ainda.	Formulação de aplicações em potencial. Projeto conceitual preliminar do elemento, fornecendo entendimento de como os princípios básicos podem ser usados.
TRL 3: Prova de conceito analítica e experimental da função crítica e/ou da característica	O conceito do elemento é elaborado e o desempenho esperado é demonstrado por meio de modelos analíticos suportados por dados experimentais/características.	Requisitos de desempenho preliminares (podem objetivar diversas missões). Incluindo definição de requisitos de desempenho funcionais.  Projeto conceitual do elemento.  <u>Entrada de dados experimentais, definição e resultados de experimentos laboratoriais.</u>  Modelos analíticos do elemento para a prova de conceito.
TRL 4: Verificação funcional em ambiente laboratorial do componente e/ou maquete	O desempenho funcional do elemento é demonstrado por ensaios com maquete em ambiente laboratorial.	Requisitos de desempenho preliminares (podem objetivar várias missões) com definição de requisitos de desempenho funcionais.  Projeto conceitual do elemento.  <u>Plano de ensaios de desempenho funcional.</u>  <u>Definição de maquete para verificação de desempenho funcional.</u>  <u>Relatórios de ensaios com a maquete.</u>
TRL 5: Verificação em ambiente relevante da função crítica do componente e/ou maquete	As funções críticas do elemento são identificadas e o ambiente relevante associado é definido. Maquetes não necessariamente em escala real, são construídas para verificar o desempenho por meio de ensaios em ambiente relevante, sujeitos a efeitos de escala.	Definição preliminar dos requisitos de desempenho e do ambiente relevante.  Identificação e análise das funções críticas do elemento.  Projeto preliminar do elemento, sustentado por modelos apropriados para a verificação das funções críticas.  <u>Plano de ensaios das funções críticas. Análise de efeitos de escala.</u>  <u>Definição de maquete para a verificação da função crítica.</u>

Nível de maturidade da tecnologia	Marco alcançado pelo elemento	Trabalho realizado (documentado)
		<u>Relatórios de ensaios com a maquete.</u>
TRL 6: Modelo demonstrando as funções críticas do elemento em um ambiente relevante	As funções críticas do elemento são verificadas e o desempenho é demonstrado em ambiente relevante com modelos representativos em formato, configuração e função.	Definição de requisitos de desempenho e do ambiente relevante. Identificação e análise das funções críticas do elemento. Projeto do elemento, sustentado por modelos apropriados para a verificação das funções críticas. <u>Plano de ensaios da função crítica.</u> <u>Definição do modelo para as verificações das funções críticas.</u> <u>Relatórios dos ensaios com o modelo.</u>
TRL 7: Modelo demonstrando o desempenho do elemento para o ambiente operacional	O desempenho é demonstrado para o ambiente operacional no solo ou, se necessário, no espaço. Um modelo representativo, refletindo todos os aspectos do projeto do modelo de voo, é construído e ensaiado com margens de segurança adequadas para demonstrar o desempenho em ambiente operacional.	Definição de requisitos de desempenho, incluindo definição do ambiente operacional. Definição e realização do modelo. <u>Plano de ensaios do modelo.</u> <u>Resultados de ensaios com o modelo.</u>
TRL 8: Sistema real completo e aceito para voo (“qualificado para voo”)	O modelo de voo é qualificado e integrado ao sistema final pronto para voo.	Modelo de voo é construído e integrado no sistema final. <u>Aceitação para voo do sistema final.</u>
TRL 9: Sistema real “demonstrado em voo” por meio de operações em missão bem-sucedida	A tecnologia está madura. O elemento está em serviço com sucesso, para a missão designada, no ambiente operacional real.	Comissionamento em fase inicial de operação. <u>Relatório de operação em órbita.</u>

GAO [2016] publicou um relatório preliminar com objetivo de estabelecer uma metodologia baseada em melhores práticas que possa ser utilizada em todo o governo federal norte americano para avaliar a maturidade tecnológica (TRA), almejando principalmente auxiliar a tomada de decisão em programas e projetos que envolvem grandes compromissos de recursos financeiros. Algumas das melhores práticas de TRA descritas são:

- O responsável pelo TRA deve entender quais evidências são necessárias para a escala TRL e qual o ambiente operacional no qual tecnologia deverá operar, dependendo se a avaliação tem como objetivo atender a exigências de órgãos governamentais ou se é um exercício interno para monitorar a maturidade de tecnologias;

- Processos de avaliação confiáveis são apoiados por artefatos e informações claras, tais como documentos de requisitos, análises, relatórios de testes e considerações de testes ambientais;
- Informações de suporte e evidências necessárias para cada nível TRL são fundamentais. Como não são exaustivos e podem variar de acordo com a tecnologia ou aplicação, é necessário adaptar estas definições para melhor refletir a tecnologia em aplicação;
- A qualidade do TRA depende da acurácia e relevância dos artefatos, dados de testes, relatórios de análise, e outras informações de suporte. Estas informações podem ser dependentes de outras tecnologias ou atividades que estejam fora do escopo da avaliação, mas que necessitem ser incluídas para melhor avaliar a maturidade tecnológica. Mudanças ou refinamentos em requisitos, parâmetros da tecnologia ou outros fatores podem provocar mudanças que podem afetar o TRA realizado, devendo neste caso o TRA ser atualizado.

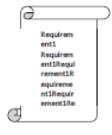
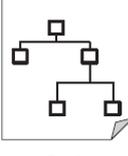
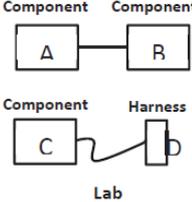
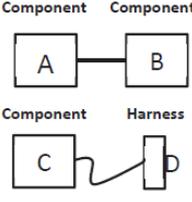
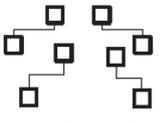
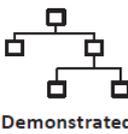
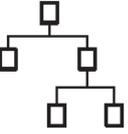
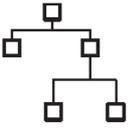
ECSS [2017] publicou o documento ECSS-E-HB-11A “Technology readiness level (TRL) guidelines” como um guia de suporte à aplicação do TRL em projetos e programas espaciais, oferecendo diretrizes para as melhores práticas de interpretação da escala TRL e da implementação do processo de avaliação da maturidade tecnológica. A ECSS adotou a norma ISO 16290:2013 como base de definições para a escala TRL.

Em relação à escala IRL, Sauser, et al. [2010] estabeleceram critérios de decisão para apoiar a avaliação em relação a cada nível de maturidade de integração IRL. Os critérios foram baseados em duas fontes: a primeira fonte foi avaliação de normas, pesquisas e outros documentos relativos à engenharia de sistemas e processos de aquisição (como DoD 5000.02, INCOSE Systems Engineering Handbook, IEEE 15288, NASA Systems Engineering Handbook); a segunda fonte foi a partir de discussão e entrevista com especialistas nas áreas de engenharia de sistemas, gestão de projetos e gestão de aquisições, para avaliar quais seriam os critérios de decisão mais relevantes para cada nível IRL. Como a integração é um tópico complexo, Sauser, et al. [2010] recomendaram que pesquisas futuras continuem com a revisão e modificação da lista de critérios de decisão e sua relevância relativa.

Austin e York [2015, 2016] apresentam a última versão da escala IRL, como descrita na Tabela 2. A lista de evidências incorpora os critérios mais relevantes identificados por Sauser, et al. [2010] e inclui particularidades de testes em relação à integração de dados. Os elementos relacionados à verificação e validação se encontram sublinhados na Tabela 2.

**Tabela 2. Escala de níveis de maturidade de integração. [Austin and York, 2015]**

IRL	Definição atual	Ilustração	Evidências necessárias
0	Sem integração	-	Nenhuma integração entre componentes especificados foi planejada ou desejada.
1	Conceito de alto nível da integração foi identificado	 <p><b>Concept</b></p>	<p>As principais tecnologias de integração foram identificadas.</p> <p>Arquitetura funcional de alto nível e pontos de interface foram definidos.</p> <p>O conceito de alto nível de operações e caso de uso principal foi iniciado.</p>

IRL	Definição atual	Ilustração	Evidências necessárias
2	Há algum nível de especificidade de requisitos para caracterizar a interação entre componentes	 <p>Requiremen</p>	<p>As entradas/saídas das principais tecnologias/meios de integração são conhecidas, caracterizadas e documentadas.</p> <p>Requisitos de interface principal e/ou especificações para tecnologias de integração foram definidos/esboçados.</p>
3	Design detalhado de integração foi definido para incluir detalhes da interface	 <p>Design</p>	<p>O projeto detalhado de interface foi documentado.</p> <p>Os diagramas de interface do sistema foram concluídos.</p> <p>O inventário de interfaces externas é concluído e as unidades de engenharia dos dados são identificadas e documentadas.</p>
4	Validação de funções entre componentes integrados em ambiente de laboratório	 <p>Lab</p>	<p><u>A funcionalidade das tecnologias de integração (módulos/funções/montagens) foi demonstrada com sucesso em um ambiente laboratorial/sintético.</u></p> <p>Método (s) e especificações de transporte de dados foram definidos.</p>
5	Validação de funções entre componentes integrados em ambiente relevante	 <p>Relevant</p>	<p><u>Módulos individuais testados para verificar se os componentes do módulo (funções) funcionam em conjunto.</u></p> <p>As interfaces externas estão bem definidas (por exemplo: fonte, formatos de dados, estrutura, conteúdo, método de suporte, etc.).</p>
6	Validação de funções entre componentes integrados em ambiente relevante, de ponta a ponta	 <p>End-to-end</p>	<p><u>Funcionalidade de ponta a ponta da integração de sistemas foi validada.</u></p> <p><u>Testes de transmissão de dados concluídos com sucesso.</u></p>
7	Demonstração da integração através de protótipo de sistema em ambiente operacional de alta fidelidade	 <p>Demonstrated</p>	<p><u>Protótipo totalmente integrado foi demonstrado com sucesso em ambiente operacional real ou simulado.</u></p> <p><u>Cada interface de sistema/software testada individualmente sob condições estressadas e anômalas.</u></p> <p><u>Verificação de interfaces, dados e funcional concluída.</u></p>
8	Integração de sistema finalizada e sistema qualificado para missão, através de teste e demonstração em ambiente operacional	 <p>Qualified</p>	<p>Sistema totalmente integrado capaz de atender aos requisitos gerais da missão em um ambiente operacional.</p> <p><u>Interfaces do sistema qualificadas e funcionando corretamente em um ambiente operacional.</u></p>
9	Integração de sistema comprovado através de missão bem-sucedida	 <p>Proven</p>	<p><u>Sistema totalmente integrado demonstrou eficácia operacional e adequação no seu ambiente operacional pretendido ou representativo.</u></p> <p>O desempenho de integração foi totalmente caracterizado e é consistente com os requisitos de usuário.</p>

Em comparação com a escala TRL, embora a escala IRL apresente uma lista de elementos como evidências necessárias, estes elementos ainda não cobrem na totalidade

e de maneira separada os aspectos relativos à definição da tecnologia, seus requisitos, a definição do modelo verificado, o plano e resultados de testes. Este fato representa uma possível oportunidade de melhoria na lista de evidências necessárias da escala IRL, no sentido de deixá-la mais objetiva e de interpretação mais clara.

#### 4. Conclusão

A pesquisa analisou as principais metodologias de avaliação de métricas de maturidade, apontando as melhores práticas e deficiências relatadas na literatura. Através desta análise é possível concluir que as práticas de verificação e validação são fundamentais para apoiar o processo de avaliação de métricas de maturidade, contribuindo com evidências e dados confiáveis de que a tecnologia atingiu determinado nível de maturidade.

A utilização de listas de evidências necessárias para cada nível de maturidade é uma boa prática introduzida há tempo relativamente recente para avaliação das escalas TRL e IRL. A lista de evidências da escala IRL apresenta uma possível oportunidade de melhoria na definição de seus elementos, se comparada à maneira que a lista da escala TRL está estruturada.

#### Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2015). ABNT NBR ISO 16290:2015 - Sistemas espaciais - Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. ABNT.
- Austin, M. F., and York, D. M. (2015). System Readiness Assessment (SRA) an illustrative example. *Procedia Computer Science*, 44(C), 486–496. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.031>
- Austin, M. F., and York, D. M. (2016). System Readiness Assessment (SRA) a Vade Mecum. In G. Auvray, J.-C. Bocquet, E. Bonjour, and D. Krob (Eds.), *Complex Systems Design & Management: Proceedings of the Sixth International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M 2015* (pp. 53–68). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. [http://doi.org/10.1007/978-3-319-26109-6\\_4](http://doi.org/10.1007/978-3-319-26109-6_4)
- Bilbro, J. (2009). Technology Assessment Calculator. JB Consulting International. Disponível em [http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/IntegratedTRL\\_AD2Calculators.aspx](http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/IntegratedTRL_AD2Calculators.aspx)
- Cornford, S. L., and Sarsfield, L. (2004). Quantitative methods for maturing and infusing advanced spacecraft technology. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 663–681. <http://doi.org/10.1109/AERO.2004.1367652>
- Department of Defense - DoD. (2011). Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance. Washington, USA: DoD. [http://doi.org/10.1007/SpringerReference\\_24357](http://doi.org/10.1007/SpringerReference_24357)
- Eisner, H. (2008). *Essentials of project and systems engineering management* (3rd ed.). Washington, USA: John Wiley & Sons.
- European Cooperation for Space Standardization - ECSS. (2017). ECSS-E-HB-11A - Technology readiness level (TRL) guidelines. Noordwijk, The Netherlands: ECSS.

- Frerking, M. A., and Beauchamp, P. M. (2016). JPL technology readiness assessment guideline. In *2016 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1–10). IEEE. <http://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500924>
- Government Accountability Office - GAO. (2016). GAO Technology Readiness Assessment Guide: Best Practices for Evaluating the Readiness of Technology for Use in Acquisition Programs and Projects--Exposure Draft. Disponível em <http://www.gao.gov/products/GAO-16-410G>
- Hobday, M. (1998). Product complexity, innovation and industrial organisation. *Research Policy*, 26(6), 689–710. [http://doi.org/10.1016/S0048-7333\(97\)00044-9](http://doi.org/10.1016/S0048-7333(97)00044-9)
- Hobday, M., Davies, A., and Prencipe, A. (2005). Systems integration: A core capability of the modern corporation. *Industrial and Corporate Change*, 14(6), 1109–1143. <http://doi.org/10.1093/icc/dth080>
- Hueter, U., and Tyson, R. (2010). Ares Project technology assessment - Approach and tools. *61st International Astronautical Congress 2010, IAC 2010, 8*, 6337–6347. Disponível em <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79959479711&partnerID=40&md5=f08088368eda0df0d1a9f62c8d218128>
- Mankins, J. C. (1995). Technology Readiness Levels. Washington, USA. <http://doi.org/10.1080/08956308.2010.11657640>
- Nolte, W. L., Kennedy, B. M., and Dziegiel, R. J. J. (2003). Technology Readiness Level Calculator. In *NDIA Systems Engineering Conference*. Disponível em <http://www.dtic.mil/ndia/2003/systems/nolte2.pdf>
- Olechowski, A., Eppinger, S. D., and Joglekar, N. (2015). Technology readiness levels at 40: A study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities. In *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology*. Portland, USA: IEEE. <http://doi.org/10.1109/PICMET.2015.7273196>
- Ristinen, T. (2010). *Expert Elicitation in Technology Readiness Assessment*. Aalto University, Espoo, Finland. Disponível em <http://lib.tkk.fi/Dipl/2010/urn100340.pdf>
- Sausser, B., Gove, R., Forbes, E., and Ramirez-marquez, J. E. (2010). Integration maturity metrics: Development of an integration readiness level. *Information Knowledge Systems Management*, 9(1), 17–46. <http://doi.org/10.3233/IKS-2010-0133>
- Sausser, B., Verma, D., Ramirez-Marquez, J., and Gove, R. (2006). From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels. *Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA*, 1–10. Disponível em <http://www.boardmansausser.com/downloads/2005SausserRamirezVermaGoveCSER.pdf>