



NÍVEL DE PRONTIDÃO DE INTEGRAÇÃO: PROPOSTA PARA PADRONIZAÇÃO DA ESCALA IRL

André Luiz Leite Ferreira – andre.ferreira@ifba.edu.br

*Program of Postgraduate in Intellectual Property and Technology Transfer for Innovation –
Institute Federal of Bahia*

André Luis Rocha Souza – andresouza@ifba.edu.br

*Program of Postgraduate in Intellectual Property and Technology Transfer for Innovation –
Institute Federal of Bahia*

Dalton Andrade Paixão – dpaixao@ifba.edu.br

*Program of Postgraduate in Intellectual Property and Technology Transfer for Innovation –
Institute Federal of Bahia*

Resumo—A avaliação da maturidade tecnológica tem sido tradicionalmente suportada pela escala Technology Readiness Level (TRL), amplamente adotada em diferentes setores. Contudo, essa escala apresenta limitações para representar o amadurecimento da integração entre elementos tecnológicos em sistemas complexos, sobretudo em Sistemas de Sistemas (SoS). Nesse contexto, o Integration Readiness Level (IRL) surge como métrica complementar, concebida para avaliar a maturidade das interfaces e reduzir riscos de falhas de integração. Entretanto, apesar de seu potencial, a escala IRL ainda carece de padronização consolidada e permanece restrita a nichos especializados, como o setor aeroespacial. Este artigo realiza uma análise crítica da literatura e das normativas internacionais sobre o IRL, identificando convergências, lacunas e oportunidades para ampliar sua adoção em diferentes domínios tecnológicos. A partir dessa análise, propõem-se elementos fundamentais para a padronização da escala, incluindo critérios mais claros, estágios bem definidos e um conjunto estruturado de documentação capaz de sustentar avaliações consistentes. Além disso, destaca-se o papel do IRL em conjunto com o TRL e o Manufacturing Readiness Level (MRL) no framework do System Readiness Level (SRL), que fornece uma visão holística da maturidade de sistemas. Conclui-se que a adoção de uma padronização robusta pode aumentar a objetividade, a confiabilidade e a aplicabilidade do IRL, fortalecendo sua função estratégica na gestão de riscos e no apoio à decisão em projetos de inovação tecnológica complexa. O artigo contribui, assim, para o avanço da discussão internacional sobre o tema e aponta direções para estudos futuros.

Palavras-chaves— Escala IRL, Integração de Sistemas, Maturidade Tecnológica, Nível de Prontidão de Integração.

Abstract—The assessment of technological maturity has traditionally been supported by the Technology Readiness Level (TRL) scale, widely adopted in different sectors. However, this scale has limitations in representing the maturity of integration between technological elements in complex systems, especially in Systems of Systems (SoS). In this context, the Integration Readiness Level (IRL) emerges as a complementary metric, designed to assess the maturity of interfaces and reduce the risk of integration failures. However, despite its potential, the IRL scale still lacks consolidated standardization and remains restricted to specialized niches, such as the aerospace sector. This article conducts a critical analysis of the literature and international standards on the IRL, identifying convergences, gaps, and opportunities to expand its adoption in different technological domains. Based on this analysis, fundamental elements for standardizing the scale are proposed,

including clearer criteria, well-defined stages, and a structured set of documentation capable of supporting consistent assessments. In addition, the role of IRL in conjunction with TRL and Manufacturing Readiness Level (MRL) in the System Readiness Level (SRL) framework, which provides a holistic view of system maturity, is noteworthy. It is concluded that the adoption of robust standardization can increase the objectivity, reliability, and applicability of the IRL, strengthening its strategic role in risk management and decision support in complex technological innovation projects. The article thus contributes to the advancement of the international discussion on the topic and points to directions for future studies.

Keywords—Integration Readiness Level, IRL Scale, Systems Integration, Technological Maturity..

1 INTRODUÇÃO

O processo de desenvolvimento de uma nação costuma ser avaliado por diversos critérios e pontos de vista. Um dos critérios comumente utilizado é a capacidade dessa nação produzir e consumir tecnologia. Para Brennen e Kreiss (2016, p. 2), “tecnologia refere-se a artefatos, sistemas e processos que são desenvolvidos para resolver problemas humanos ou melhorar condições de vida, incorporando conhecimento científico, técnico e prático”. Os referidos autores ainda ressaltam que a tecnologia não se limita a ferramentas físicas, mas inclui também softwares, procedimentos e práticas organizacionais. Considera-se que a tecnologia é um fenômeno sociotécnico que envolve a interação entre conhecimento, objetos e contextos sociais, sendo tanto um produto quanto um processo dinâmico de inovação. Por sua vez, Bijker, Hughes e Pinch (2012) enfatizam que tecnologia deve ser entendida como um sistema socio-técnico, no qual artefatos, pessoas, organizações e normas interagem para gerar valor e impacto social

Considerando que uma tecnologia não nasce pronta para uso imediato, afirma-se que o seu desenvolvimento ocorre de forma processual. De acordo com Velho et al. (2017, p. 119), “Desde o momento em que é criada ou conceitualizada, necessita passar por diversas etapas de evolução, até a sua plena operação, de modo que esteja pronta para o uso ou a comercialização”. Os mesmos autores ainda afirmam que a tecnologia precisará amadurecer até ser capaz de fazer “parte de sistemas ou subsistemas e ser utilizada com segurança no mercado” (Velho et al., 2017, p. 119).

Todo esse processo de desenvolvimento de uma tecnologia pode ser dividido e avaliado em diferentes níveis de maturidade ou prontidão. O conceito de maturidade tecnológica surgiu na década de 1950, associado às necessidades humanas, ao crescimento econômico e à evolução das tecnologias da informação nas organizações. Já a prontidão tecnológica é entendida como um estágio de desenvolvimento no qual um produto ou tecnologia pode ser projetado e implementado com desempenho, custos, prazos e qualidade previsíveis, servindo como indicador da maturidade tecnológica.

Por envolver um grande volume e diversidade de recursos, além da necessidade de gestão do tempo (cronograma) e de custos, esses processos de desenvolvimento de tecnologias requerem pontos de ajustes e controles bem definidos, associados a uma constante análise de riscos. Essa lacuna foi identificada e deu origem a um método largamente empregado para avaliar o nível de prontidão de uma determinada tecnologia, que tem se tornado uma importante métrica para os tomadores de decisão: o Technology Readiness Level (TRL). A National Aeronautics and Space Administration (NASA), em 1969, cunhou o conceito de mensuração dos níveis de maturidade tecnológica em um dos seus relatórios técnicos, no qual foram apresentados os requisitos avançados de tecnologia espacial da referida instituição.

Destaca-se que desde sua criação pela NASA, a escala TRL evoluiu para se tornar um padrão internacional de avaliação de maturidade tecnológica (Mankins, 2009; ABNT, 2015). A referida escala associa níveis claros de desenvolvimento tecnológico a evidências técnicas, abrangendo desde a concepção até a operação de sistemas. Ainda assim, apesar de sua eficácia para tecnologias individuais, a TRL não captura os riscos inerentes à integração de múltiplas tecnologias em sistemas complexos (Olechołowski et al., 2015; Tomaschek et al., 2016).



Mesmo originalmente desenvolvida para o setor aeroespacial, a TRL foi, e continua sendo, adaptada por outras instituições, como o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) e a Agência Espacial Europeia (ESA), mantendo os nove níveis fundamentais e o princípio básico de mensurar o grau de maturidade tecnológica (Mankins, 2009; European Space Agency, 2018). A escala TRL também foi normatizada internacionalmente pela ABNT NBR ISO 16290:2013, intitulada Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment (ABNT, 2015), o que reforça sua aplicabilidade e padronização para avaliação de tecnologias em diferentes contextos.

A área aeroespacial, notabiliza-se pelo alto grau de complexidade exigida em suas soluções, o que na maioria dos casos pode ser chamado de sistemas complexos. Mitchell (2009) define tais sistemas como sistemas compostos por múltiplos elementos interconectados, cujas interações geram comportamentos emergentes e imprevisíveis, não explicáveis apenas pela análise das partes isoladas. Bar-Yam (2016) reforça essa perspectiva ao destacar que a complexidade surge da interdependência dinâmica entre componentes, gerando propriedades que transcendem a soma das partes. Adicionalmente, Holland (2014) acrescenta que tais sistemas são adaptativos, capazes de aprender e evoluir diante de mudanças ambientais, o que exige abordagens multidisciplinares para sua compreensão e gestão eficaz. Além disso, Levin et al. (2012) ressaltam que os sistemas complexos são ubiquamente encontrados em contextos naturais, sociais e tecnológicos, demandando métodos analíticos que integrem diferentes níveis de análise.

Observa-se que a rápida evolução tecnológica e a crescente complexidade dos produtos e sistemas contemporâneos tornam a integração tecnológica um desafio decisivo para projetos de inovação. A TRL, amplamente adotada desde sua criação pela NASA, para medição da maturidade de tecnologias isoladas, não abrange de forma adequada os riscos associados à integração dessas tecnologias em sistemas maiores e mais complexos, focando-se em hardware, desconsiderando: 1) A integração de tecnologias, 2) A maturidade de interfaces e 3) O sistema como um todo.

Ainda nesse contexto, o Government Accountability Office (GAO) identificou a necessidade de avaliar o desenvolvimento de sistemas de armas e gerenciar os riscos associados ao processo. Para o GAO, os sistemas frequentemente falhavam porque a atenção era dada apenas à tecnologia em si, negligenciando o conhecimento das ligações/integrações entre todas as tecnologias e nesse caso, a integração é considerada a parte mais difícil de qualquer programa de desenvolvimento.

Um outro conceito a ganhar importância nos últimos anos foi o de produto. Ulrich e Eppinger (2021) definem produto como uma combinação de materiais, componentes e processos que satisfazem necessidades específicas dos usuários, incorporando funcionalidades, estética e valor econômico. Para Sanders e Stappers (2008), produtos modernos vão além da tangibilidade, incluindo serviços e experiências integradas, refletindo a crescente convergência entre bens físicos e digitais. Pine e Gilmore (2019) reforçam que produtos contemporâneos frequentemente fazem parte de sistemas maiores, oferecendo valor por meio de ecossistemas complexos de serviços, tecnologia e interação com o usuário. Assim, produtos são expressões concretas da tecnologia aplicada, voltados para atender demandas do mercado e da sociedade, em contextos cada vez mais dinâmicos e interconectados.

Nesse cenário, caracterizado pelo desenvolvimento de produtos multitecnológicos (formado por mais de uma tecnologia), percebeu-se a necessidade de se avaliar não apenas a maturidade de cada tecnologia, mas também a maturidade da integração entre essas tecnologias. Dessa forma, em 2006 em um estudo fundamental de pesquisadores do Stevens Institute of Technology, liderados por Brian J. Sauser, o artigo intitulado "From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels", apresentou e introduziu os conceitos: Integration Readiness Level (IRL) e System Readiness Level (SRL). O SRL (que não é o foco desse artigo) foi concebido como uma métrica de maturidade de nível de sistema, que é derivada de uma matriz que utiliza as métricas TRL e IRL. Conceitualmente, o IRL (como medida da maturidade da integração) é um componente necessário para o cálculo do SRL. O IRL foi concebido para medir a maturidade da integração e combinado com o TRL é capaz de criar o SRL, que oferece uma avaliação da maturidade do sistema como um todo. O SRL quantifica a maturidade tecnológica geral de um sistema utilizando uma matriz que inclui tanto o TRL quanto o IRL.



A IRL foi proposta como complemento ao TRL, com o objetivo de mensurar a prontidão da integração entre elementos tecnológicos, oferecendo uma métrica essencial para a avaliação de riscos, o planejamento tecnológico e a comunicação gerencial em projetos de alta complexidade. Sua intenção era fornecer uma análise sistemática da interconexão de interações compatíveis e a comparação consistente da maturidade entre os pontos de integração. Entretanto, a ausência de uma padronização consolidada dificulta sua aplicação consistente entre setores e organizações, limitando sua difusão além de nichos especializados, como o setor aeroespacial.

A primeira versão do IRL foi concebida a partir da escala ISO Open Systems Interconnect (OSI) de sete níveis, utilizada em redes de computadores, focada na integração de dados. Posteriormente, o IRL foi expandido para uma escala de nove níveis para refletir melhor o processo de desenvolvimento de sistemas e ser mais consistente com os fundamentos do TRL. As definições dos níveis IRL abrangem desde a identificação inicial de interfaces (IRL 1), passando pela caracterização da interação (IRL 2), o design detalhado de integração (IRL 3), validação funcional em ambiente de laboratório (IRL 4), controle da integração (IRL 5), capacidade de aceitar, traduzir e estruturar informações (IRL 6), demonstração em protótipo em ambiente operacional (IRL 7), até a qualificação da missão (IRL 8) e missão comprovada (IRL 9) através de operações bem-sucedidas (Sausser et al., 2010).

Sausser et al. (2010) ainda argumentam que a utilização do IRL é crucial para o sucesso de projetos de engenharia de sistemas, especialmente em áreas onde a integração de múltiplos subsistemas é comum, como na indústria aeroespacial, defesa, saúde e automotiva (Sausser et al., 2010). O IRL permite que os gestores de projetos e engenheiros identifiquem potenciais problemas de integração antecipadamente, facilitando a tomada de decisões informadas e a implementação de estratégias de mitigação de riscos. Ainda de acordo com os autores, o uso do IRL não apenas melhora a eficiência e a eficácia da integração, mas também contribui para a redução de custos e o aumento da confiabilidade dos sistemas desenvolvidos (Sausser et al., 2010).

A escala IRL foi proposta para representar a maturidade da integração entre os elementos tecnológicos de um sistema (Sausser, Verma, Ramirez-Marquez, & Gove, 2006) e vem evoluindo ao longo dos últimos anos. Os referidos autores consideram que o IRL é uma forma de medir as interações possíveis em várias tecnologias e, também, poder comparar a maturidade existente entre os pontos de integração nas camadas do TRL. Adicionalmente, propõem, também, avaliar a maturidade de tecnologias com outras tecnologias, em fases em desenvolvimento ou prontas. Ou seja, verificam “a possibilidade de integração, e quais as mudanças possíveis para que exista essa integração”, avaliando ainda o risco possível dessa integração. (Sausser, et. al., 2006, pág. 5).

Críticas relevantes destacam a necessidade de critérios de avaliação mais objetivos, documentação padronizada e maior granularidade para diferentes tipos de interfaces e interações (Kujawski, 2013; Jesus & Chagas Junior, 2020). A informalidade atual pode comprometer decisões gerenciais e aumentar os riscos de falhas integrativas em projetos de alta complexidade.

A padronização é essencial para garantir confiabilidade, comparabilidade e rigor em avaliações técnicas (Persons, Mackin, 2020). No caso do IRL, normas internacionais como ISO/IEC/IEEE 15288 e 15289 fornecem frameworks para definir processos de ciclo de vida de sistemas e produtos de informação que podem fundamentar avaliações mais objetivas (Jesus & Chagas Junior, 2020). A adaptação desses modelos para o IRL fortalece a escala como instrumento decisório, ampliando sua relevância como métrica de integração e ferramenta estratégica de gestão de riscos.

Apesar de seu potencial, o uso do IRL ainda está restrito a nichos altamente especializados, como o setor aeroespacial. Diante disso, este artigo propõe a adaptação e aplicação do IRL para avaliação da maturidade de produtos em diferentes estágios de desenvolvimento, especialmente aqueles que dependem da articulação entre múltiplas tecnologias, organizações e ambientes regulatórios.

Esse trabalho se justifica por contribuir com a discussão sobre o nível de prontidão de integração, tendo em vista o acelerado processo de desenvolvimento de produtos multitecnológicos que impõem novos desafios tanto à avaliação da prontidão tecnológica e da integração entre as diversas tecnologias, quanto à



gestão da integração entre sistemas. Apesar de seu potencial, o uso do IRL no Brasil ainda está restrito a nichos altamente especializados, como o setor aeroespacial. Realizar uma reflexão acerca da escala IRL, fora desse contexto permite caracterizar suas principais contribuições, identificar lacunas e propor direções para sua padronização e maior aplicabilidade.

Assim, o objetivo deste artigo é analisar criticamente a escala IRL atual, propor elementos para sua padronização e subsidiar sua implementação mais ampla como ferramenta de gestão e avaliação de prontidão tecnológica integrada.

2 METODOLOGIA

Esta pesquisa realizou revisão sistemática da literatura científica, normas técnicas e diretrizes institucionais referentes às escalas TRL e IRL. A análise qualitativa focou na identificação das melhores práticas, convergências e limitações associadas à escala IRL. Ao buscar a compreensão de um tema relativamente pouco conhecido no Brasil, e de uso mais comum numa área específica, a aeroespacial, que é o nível de prontidão de integração (IRL), a partir da identificação e caracterização de escalas IRL usadas como referência em avaliações de integração de tecnologias, considera-se este estudo uma pesquisa exploratória com aspectos descritivos.

De acordo com Gil (2002) o uso concomitante das pesquisas exploratória e descritiva, traz para o estudo o refinamento de conceitos/desenvolvimento de percepções (contribuição exploratória), além de apresentar particularidades próprias de um determinado objeto de estudo (contribuição descritiva).

Quanto a sua abordagem metodológica, classifica-se essa pesquisa como um estudo qualitativo por buscar, além da identificação e caracterização das escalas IRL, a apresentação delas a partir de inferências dos autores baseadas na literatura. Esse tipo de abordagem é adequada quando se busca captar a subjetividade, as múltiplas realidades e os sentidos atribuídos pelos participantes ao objeto de estudo (De Souza Minayo, 2017). A autora ainda enfatiza a necessidade de rigor metodológico e reflexão crítica do pesquisador sobre seu papel durante o processo investigativo. Essas características estão alinhadas com o estudo realizado, uma vez que foram utilizadas múltiplas fontes documentais para análise.

Quanto aos procedimentos adotados nesta pesquisa, destacam-se as abordagens bibliográfica e documental. A primeira delas, pesquisa bibliográfica segundo alguns autores (Gil, 2002; Lakatos e Marconi, 2017) é realizada a partir de livros, artigos científicos e outras publicações especializadas, sendo utilizadas na construção do referencial teórico da pesquisa. Destaca-se que para este estudo, foram consultadas bases de dados renomadas, como o Portal de Periódicos da CAPES (CAPES, 2025) e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (IBICT, 2025), utilizando descritores como “Nível de Prontidão de Integração” e sua versão em inglês “Integration Readiness Level”, sem delimitação temporal ou territorial, garantindo abrangência e diversidade de fontes.

A pesquisa documental, de acordo com Martins (2010) é especialmente valiosa em estudos que demandam contextualização histórica e análise crítica de fontes secundárias, nesse estudo a pesquisa documental foi realizada com a utilização de documentos, legislações, relatórios etc., que por suas características próprias, configura-se como uma importante fonte de dados, auxiliando o pesquisador a estabelecer com clareza determinadas inferências, a partir da análise da qualidade dos registros e dos documentos disponibilizados. No presente estudo, foram consultados websites institucionais, documentos oficiais de organizações e empresas relacionadas ao tema, além de informações atualizadas sobre o Nível de Prontidão de Integração, com delimitação temporal (versão mais recente de 2025) e territorial (dados referentes ao Brasil e dados globais, quando disponíveis)

Em relação à organização e tratamento dos dados, optou-se por realizar apresentação das escalas com base na análise de conteúdo. De acordo com Bardin (2016), a análise de conteúdo permite a identificação de categorias e padrões emergentes a partir dos dados, o que facilita a compreensão aprofundada do fenômeno estudado. Outros autores, como Gläser-Zikuda, Hagenauer e Stephan (2020) destacam que a análise de

conteúdo é eficaz para tratar fenômenos multifacetados, caso do estudo em questão, utilizando tanto abordagens indutivas quanto dedutivas para a construção de categorias e códigos analíticos. De Souza Minayo (2014) ainda enfatiza que o uso da referida análise possibilita o acesso ao universo dos significados, crenças e motivações dos sujeitos, sendo essencial para pesquisas qualitativas que buscam compreender fenômenos sociais complexos.

Assim, a apresentação das escalas IRL poderá mediar e colaborar com o cenário brasileiro quanto à análise de prontidão de integração entre tecnologias. Além disso, parâmetros e critérios extraídos das normas ISO/IEC/IEEE 15288 e 15289 foram adaptados para estruturar proposta preliminar de padronização dos níveis IRL e suas evidências documentais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PRINCIPAIS PONTOS DE CONVERGÊNCIA ENTRE OS ESTUDOS

Foram identificados como principais pontos de convergência entre os estudos sobre o Nível de Maturidade de Integração (IRL): 1) Complementaridade do IRL ao TRL, 2) Abordagem de Riscos e Desafios de Integração, 3) Necessidade de Objetividade e Avaliação Baseada em Evidências, 4) Uso de Visões de Arquitetura e Matrizes (DSM/DMM), 5) Foco em Sistemas Espaciais e Aquisição de Defesa (DoD) e 6) Ferramenta de Comunicação Gerencial. Os principais são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais pontos de convergência dos estudos acerca do IRL.

Ponto de Convergência	Estudos Principais que Sustentam a Convergência
Complementaridade do IRL ao TRL	- Gove et al. (2007); - Sauser et al. (2008, 2010); - Jesus e Chagas Junior (2018, 2020, 2022); - Ross (2016).
Abordagem de Riscos e Desafios de Integração	- Sauser et al. (2010); - Kujawski (2013); - Jesus e Chagas Junior (2018, 2022).
Necessidade de Objetividade e Avaliação Baseada em Evidências	- Mankins (2009) - Jesus e Chagas Junior (2020)
Uso de Visões de Arquitetura e Matrizes (DSM/DMM)	- Maier e Rechtin (2000); - Ross (2019); - Jesus e Chagas Junior (2018, 2022).
Foco em Sistemas Espaciais e Aquisição de Defesa (DoD)	- Gove et al. (2007); - Tzau (2013); - Madni e Sievers (2014); - Jesus e Chagas Junior (2018, 2020).
Ferramenta de Comunicação Gerencial	- Sauser et al. (2009, 2010); - Jesus e Chagas Junior (2022).

Fonte: Criado pelos autores (2025).

uma métrica para medição sistemática da interface de interações compatíveis entre várias tecnologias e a comparação consistente da maturidade entre pontos de integração, complementando os conceitos de TRL. Jesus e Chagas Junior (2018, 2020, 2022) identificaram e afirmaram que o IRL e o SRL foram propostos para complementar o TRL, abordando as limitações da TRL, além disso, obtiveram por meio de entrevistas, resultados positivos sobre sua utilidade e complementaridade com a escala TRL. Ross (2016) propôs que o IRL deve ser usado em conjunto com o TRL para fornecer uma avaliação de prontidão em nível de sistema. Gove et al. (2007) afirmaram que avaliação da escala IRL complementa a avaliação da escala TRL, pois o IRL conseguiu representar eventos de testes de interface e de sistema que o TRL não representou.

Considerando a convergência "Abordagem de Riscos e Desafios de Integração", enquanto Jesus e Chagas Junior (2018, 2022) indicaram que o IRL representa níveis de risco para a integração de tecnologias e citaram que as falhas de muitos sistemas espaciais estão relacionadas à integração de componentes, Sauser et al. (2010) concluíram que o IRL pode identificar com sucesso os riscos envolvidos na maturidade da integração tanto no nível de componente quanto no nível de sistema.

Ainda que haja convergência com tema, Kujawski (2013) criticou que o risco e o esforço necessários para níveis de prontidão mais altos não são considerados na avaliação atual do TRL e IRL. O estudo robusto de Gove et al. (2007) demonstrou que a aplicação do IRL destacou baixos níveis de maturidade de integração e identificou áreas específicas de desenvolvimento que necessitavam de maior atenção gerencial e de engenharia em estudos de caso como o Mars Climate Orbiter. Para os autores, a integração sempre envolve interfaces entre várias tecnologias, diferenciando o risco de integração de outros riscos do programa.

Por sua vez, ao analisar a "Necessidade de Objetividade e Avaliação Baseada em Evidências", Mankins (2009) destacou que os critérios de decisão do IRL foram desenvolvidos a partir da revisão de padrões de engenharia de sistemas e aquisição, reforçados por discussões com especialistas no assunto. A proposição de um framework minimizou as intervenções de avaliadores externos utilizando objetivos quantificáveis, alertando que a subjetividade e a intensidade humana são desvantagens das métricas de prontidão.

Jesus e Chagas Junior (2020) propuseram um conjunto de itens de informação para documentar as evidências necessárias para cada nível da escala IRL, baseados em padrões internacionais. A pesquisa buscou desenvolver um conjunto verificado e validado de métricas IRL e um guia de apoio de critérios de amadurecimento críticos para tornar a avaliação menos heurística ou subjetiva.

Aplicar a escala IRL apresenta alguns desafios de implementação, onde são buscadas abordagem que minimizem ou redução esse esforço. Nesse sentido, o "Uso de Visões de Arquitetura e Matrizes (DSM/DMM)" pode ser encontrado em Maier e Rechtin (2000). Os referidos autores afirmaram que visões de arquitetura são necessárias em sistemas complexos que exigem um elemento organizador de nível superior, para organizar a análise e diferenciar as interações. Por sua vez, Ross (2016) confirmou a aplicação de avaliações IRL separadas para diferentes interações.

Jesus e Chagas Junior (2018, 2022) inicialmente observaram que a escala IRL é comumente avaliada usando uma matriz DSM para representar a integração entre os componentes do sistema. O DMM pode apoiar a compreensão da progressão do design de conceitos abstratos para a materialização de elementos e interações do sistema. Em seguida, desenvolveram uma metodologia para aplicar o IRL usando visões de arquitetura através da matriz de estrutura de projeto (DSM) e da matriz de mapeamento de domínio (DMM). Eles também mostraram que o método proposto supera as limitações das avaliações tradicionais de IRL ao separar os tipos de interações e incorporar informações sobre eles.

Quanto ao item de convergência "Foco em Sistemas Espaciais e Aquisição de Defesa (DoD)", observou-se a ênfase em entender os problemas e desafios de integração dos principais Sistemas Espaciais do DoD. Para alguns autores, o IRL foi desenvolvido para apoiar a aquisição de defesa. Gove et al. (2007) avaliaram o IRL com estudos de caso de sistemas múltiplos, incluindo Mars Climate Orbiter, Ariane 5 e Hubble Space Telescope. Por sua vez, Tzau (2013) aplicou o IRL na avaliação de riscos de integração de tecnologia em um programa de aquisição do Exército dos EUA.

Madni e Sievers (2014) indicaram que os sistemas espaciais do DoD devem atender a requisitos de

integração que podem incluir acessibilidade, confiabilidade, segurança, resiliência e adaptabilidade. Em termos de Brasil, Jesus e Chagas Junior (2018, 2020) indicaram que as falhas de muitos sistemas espaciais estão relacionadas à integração e realizaram um estudo de caso com o programa China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS).

Por fim, identificou-se a convergência "Ferramenta de Comunicação Gerencial", onde observa-se que o IRL ajuda a destacar áreas que precisam de foco adicional para planejamento antecipado. Sausser et al. (2009, 2010) afirmaram que o IRL fornece uma ontologia comum para medir e descrever o desenvolvimento da aquisição e do sistema. Os referidos autores também propuseram um método, como artefato, que pode ser valioso para gerentes de projeto, arquitetos de sistema e engenheiros de sistema como ferramenta de comunicação. Eles também concluíram que o IRL fornece uma linguagem comum para todos os stakeholders envolvidos nos projetos.

Jesus e Chagas Junior (2022) apontaram que o IRL visa fornecer uma comunicação concisa com múltiplos stakeholders. Eles também indicaram que a análise gráfica superou a análise numérica em importância para os artefatos, reforçando a sugestão de uma visualização concisa da prontidão do sistema para análise gerencial.

Também foram identificadas lacunas e questões preocupantes sobre a escala IRL. Elas serão descritas a seguir.

3.2 LACUNAS E QUESTÕES DE PESQUISA IDENTIFICADAS

Analisando de forma aprofundada tanto a literatura, quanto as práticas atuais, diversas lacunas e desafios críticos foram identificados, e embasam a motivação para a padronização e aprimoramento da escala Integration Readiness Level (IRL). Dentre eles, destacam-se: 1) Melhoria da Metodologia e Critérios de Avaliação do IRL, 2) Integração e Arquitetura de Sistemas Complexos, e 3) Aplicação e Validação em Cenários Reais.

Em relação à “Melhoria da Metodologia e Critérios de Avaliação do IRL”, persistem preocupações com a subjetividade e imprecisão nas avaliações das escalas TRL e IRL, evidenciando oportunidade para maior objetividade e rigor metodológico. Outro fator identificado foi a ausência de um conjunto formal e estruturado de critérios decisórios que fosse capaz de orientar profissionais na atribuição dos níveis IRL apropriados.

Adicionalmente, observou-se que é essencial investigar o impacto do tipo de integração (software, hardware, ou ambos) na determinação adequada do IRL e que os critérios relativos às fases sintáticas da IRL (níveis 4 a 7) são pouco claros e dificultam a realização de avaliações consistentes, principalmente devido à diversidade das atividades e tipos de projetos envolvidos. Uma alternativa viável nesse último caso, seria a revisão e recalibração das métricas do IRL, incluindo uma ponderação dos atributos baseados em dados de criticidade, conforme práticas adotadas em outras metodologias.

Considerando a "Integração e Arquitetura de Sistemas Complexos", notou-se que enquanto a escala TRL limita-se a avaliar tecnologias isoladas e não integrações sistema-a-sistema, a escala IRL necessita de procedimentos mais detalhados para a definição do alvo da integração, identificação das interfaces e derivações de tecnologias específicas sob a perspectiva da engenharia de sistemas.

Observou-se ainda a falta de uma exploração mais aprofundada da multiplicidade de tipos de interfaces em sistemas complexos na aplicação tradicional da escala IRL, culminando numa atribuição de um único nível de prontidão entre pares de elementos. A crescente complexidade identificada no desenvolvimento de sistemas e produtos multitecnológicos demanda abordagens sistêmicas avançadas para análise arquitetural e comunicação das avaliações IRL.

Por fim, no caso da "Aplicação e Validação em Cenários Reais" acredita-se que a análise do IRL deve ser incorporado desde as fases iniciais do desenvolvimento de sistemas e produtos. Outro ponto que merece destaque é que a validação e verificação das métricas e ferramentas ainda não atingiram o nível esperado em relação aos desenvolvimentos conceituais.



Na primeira etapa, o foco principal deve ser a identificação clara dos pontos de integração (nesse caso, as interfaces) entre subsistemas, podendo adicionalmente, mapear as responsabilidades das equipes envolvidas no projeto (engenharia, garantia de qualidade e operações).

Em seguida (etapa 2), indica-se a adoção de modelos padronizados, inspirados nas normas ISO/IEC/IEEE 15288 e 15289, enfatizando cada um dos artefatos de evidência, permitindo dessa forma: a) A especificação de Requisitos de Interface (IRL 1–3), b) A elaboração tanto de um Plano de Testes de Integração, quanto de Relatórios de Validação Laboratorial (IRL 4–6), e c) Registrar os Testes em Ambiente Operacional, consolidando-os em Relatórios de Qualificação (IRL 7–9).

Continuando, na etapa 3, a proposta em questão indica que para cada nível IRL seja aplicada uma lista de verificação contendo parâmetros objetivos, dentre os quais: a) Compatibilidade de Protocolo (software/hardware), b) Desempenho de Latência e Largura de Banda, c) Taxa de Erro de Comunicação e d) Testes de Resiliência a Falhas.

Na etapa 04, a enfatiza-se a integração da avaliação IRL em sistemas de PLM, para garantir a rastreabilidade e reuso dos artefatos. Essa medida, permite automatizar a geração de relatórios de prontidão de integração, reduzindo o trabalho manual e eventuais riscos de inconsistência.

A última etapa dessa proposta busca conferir excelência a todo o processo, indicando a realização de treinamentos periódicos para engenheiros de sistemas, validadores e gestores, enfatizando a interpretação dos critérios IRL. Adicionalmente, propõe-se o estabelecimento de um comitê de governança capaz de avaliar as necessidades de atualizações nos templates e nos critérios, com base em lições aprendidas e em novas normas.

Acredita-se que a formalização desses elementos contribuirá com o aumento da objetividade, da confiabilidade e da comparabilidade das avaliações de integração, fortalecendo o uso da escala IRL como instrumento de gestão de riscos, apoio à decisão e comunicação gerencial em projetos de inovação tecnológica complexa.

4 CONCLUSÃO

O estudo permitiu evidenciar que o Integration Readiness Level (IRL) foi desenvolvido para preencher uma lacuna não contemplada integralmente pelo Technology Readiness Level (TRL), ao mensurar a maturidade da integração em Sistemas de Sistemas (SoS). A escala de nove níveis, estruturada em dimensões semântica, sintática e pragmática, oferece uma análise sistemática das interfaces, permitindo identificar riscos e apoiar decisões estratégicas desde as fases iniciais do ciclo de vida dos sistemas.

Constatou-se que o IRL complementa o TRL e amplia sua aplicabilidade, especialmente em projetos de alta complexidade, ao reduzir falhas recorrentes de integração, apoiar a gestão de riscos e melhorar a comunicação entre stakeholders. A integração do IRL com o TRL e o Manufacturing Readiness Level (MRL) no framework do System Readiness Level (SRL) representa um avanço significativo, ao possibilitar uma visão holística da maturidade de sistemas tecnológicos.

Conclui-se que o IRL transcende sua função como métrica de integração, constituindo-se como ferramenta de apoio à decisão em processos de aquisição, planejamento tecnológico e gestão de projetos. Sua adoção em diferentes setores, além do aeroespacial, abre novas perspectivas para o fortalecimento da governança em inovação e a inserção segura de tecnologias emergentes. Recomenda-se o aprofundamento de estudos empíricos e comparativos que possam contribuir para a padronização de sua aplicação e consolidação como referência internacional em avaliação de maturidade de integração.

Além disso, a análise das contribuições recentes da literatura (Jesus & Chagas Jr., 2020; Sauser et al., 2010; Austin & York, 2015) evidencia que, embora o IRL tenha origem no setor aeroespacial, sua aplicação já vem sendo expandida para outras indústrias intensivas em tecnologia, como defesa, energia e petróleo e gás. Tal constatação reforça a pertinência de discutir sua adoção no contexto brasileiro, marcado pelo acelerado desenvolvimento de produtos multitecnológicos que demandam novas abordagens de avaliação da prontidão de integração.



Acredita-se que a padronização da escala IRL representa um avanço estratégico para a gestão eficaz da integração tecnológica em sistemas complexos, superando as limitações do uso isolado da TRL. Ao estabelecer critérios claros e um conjunto estruturado de documentação de suporte para os níveis IRL, é possível alcançar avaliações mais objetivas, confiáveis e comunicáveis, alinhadas às melhores práticas internacionais.

Recomenda-se a validação da proposta em diferentes setores e o desenvolvimento de ferramentas digitais para apoiar a avaliação sistemática da IRL, ampliando sua adoção e impacto positivo em projetos inovadores complexos. Assim, este trabalho contribui para ampliar a reflexão sobre a aplicabilidade da escala IRL fora do nicho aeroespacial, sinalizando caminhos para sua utilização como instrumento de gestão e política de inovação no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 16290:2015**: Sistemas espaciais — Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação. ABNT, 2015.
- ARMSTRONG, J. R. Applying Technical Readiness Levels to Software: New Thoughts and Examples. In: **INCOSE International Symposium**. p.838-845, 2010.
- AUSTIN, M. F., YORK, D. M. **System Readiness Assessment (SRA)**: A Vade Mecum, 2015.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2016.
- CAPES. Periódicos Capes. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em 02 jul. 2025.
- DE SOUZA MINAYO, M. C. Amostragem e saturação em pesquisa qualitativa: consensos e controvérsias. **Revista pesquisa qualitativa**, v. 5, n. 7, p. 1-12, 2017.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Altas, 2002.
- IBICT. Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), 2022. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br>. Acesso em 02 jul. 2025.
- JESUS, G. T., CHAGAS JUNIOR, M. F. Information items to improve Integration Readiness Levels evaluation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 3, p. e20190685, 2020.
- KREISS, D.; BRENNEN, J. S. Normative models of digital journalism. **The Sage handbook of digital journalism**, p. 299-314, 2016.
- KUJAWSKI, E. Analysis and critique of the system readiness level. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, v. 43, n. 4, p. 979-987, 2012.
- MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: A retrospective. **Acta Astronautica**, v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009.
- NASA, **Nasa systems engineering handbook**. 2017. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170001761>. Acesso em 08 jul 2025.
- OLECHOWSKI, A., EPPINGER, S. D., JOGLEKAR, N. Technology readiness levels at 40: A study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities. In: **2015 Portland international conference on management of engineering and technology (PICMET)**. IEEE, p. 2084-2094, 2015.
- PERSONS, T. M., MACKIN, M. **Technology readiness assessment guide: best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects**. 2020. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1105604>. Acesso em: 06 jul 2025.
- PINE, B. J., GILMORE, J. H. **The experience economy**. Harvard Business Press, 2011.
- ROSS, S. **Application of System and Integration Readiness Levels to Department of Defense Research and Development (Postprint)**. 2016.



SANDERS E., STAPPERS, J. Co-creation and the new landscapes of design. **Co-design**, v. 4, n. 1, p. 5-18, 2008.

SAUSER, B., VERMA, D., RAMIREZ-MARQUEZ, J., GOVE, R. From TRL to SRL: The concept of systems readiness levels. In: **Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles, CA**, 2006.

SAUSER, B. J., GOVE, R., FORBES, E., RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. Integration maturity metrics: Development of an integration readiness level. **Information Knowledge Systems Management**, v. 9, n. 1, p. 17-46, 2010.

SILVA NETO, A. M. **Método para Avaliação do grau de maturidade no processo de produção de produtos da indústria metal mecânica**. 2015. 162 p. Dissertação (Mestrado Profissional) – Curso de Mestrado Profissional e Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Área de Produção – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2015. Disponível em:

http://www.fcmfmpep.org.br/site/sites/default/files/dissertacoes/turma2/Almiro_dp_078_2015.pdf. Acesso em: 08 jul 2025.

TOMASCHEK, K., OLECHOŁOWSKI, A. L., EPPINGER, S. D., JOGLEKAR, N. R. A survey of technology readiness level users. In: **INCOSE International Symposium**, p. 2101-2117, 2016.

ULRICH, K.T.; EPPINGER, S.D. **Product Design and Development**, 5. ed. New York : The McGraw-Hill Companies, p. 183–206, 2012.

VELHO, S. R. K. et al. Nível de Maturidade Tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 45, p. 119-140, 2017.