



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/02.11.18.09-TDI

AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DE INTEGRAÇÃO ENTRE ELEMENTOS TECNOLÓGICOS A PARTIR DE VISÕES DE ARQUITETURA DE SISTEMAS ESPACIAIS

Gabriel Torres de Jesus

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Milton de Freitas Chagas Junior, aprovada em 11 de fevereiro de 2019.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SNEMA2>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos
Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia
Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra
(CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/02.11.18.09-TDI

AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DE INTEGRAÇÃO ENTRE ELEMENTOS TECNOLÓGICOS A PARTIR DE VISÕES DE ARQUITETURA DE SISTEMAS ESPACIAIS

Gabriel Torres de Jesus

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Milton de Freitas Chagas Junior, aprovada em 11 de fevereiro de 2019.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SNEMA2>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Jesus, Gabriel Torres de.

J499a Avaliação da maturidade de integração entre elementos tecnológicos a partir de visões de arquitetura de sistemas espaciais / Gabriel Torres de Jesus. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxii + 170 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/02.11.18.09-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientador : Dr. Milton de Freitas Chagas Junior.

1. Engenharia Aeroespacial. 2. Engenharia de Sistemas. 3. Integração de sistemas. 4. Níveis de maturidade de integração. 5. Visões de arquitetura. I.Título.

CDU 629.7.06:629.78



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Gabriel Torres de Jesus**

Título: "AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DE INTEGRAÇÃO ENTRE ELEMENTOS TECNOLÓGICOS A PARTIR DE VISÕES DE ARQUITETURA DE SISTEMAS ESPACIAIS"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

Engenharia e Tecnologia Espaciais/Eng. Gerenc. de Sistemas Espaciais

Dr. Leonel Fernando Perondi

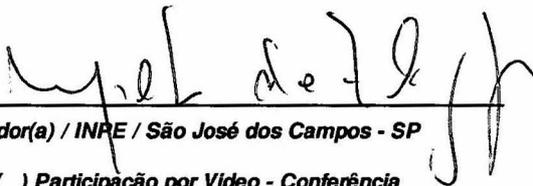


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Milton de Freitas Chagas Junior



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dra. Ana Maria Ambrosio



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Dr. Vilson Rosa de Almeida



Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador, dr. Milton de Freitas Chagas Júnior, por todo o direcionamento, atenção e apoio à pesquisa e à minha formação durante o período do mestrado. Aos professores dr. Leonel Fernando Perondi e dra. Ana Maria Ambrósio, que ajudaram a direcionar a pesquisa no exame de proposta de dissertação com importantes sugestões de cunho prático e teórico.

À Coordenação do Programa CBERS por autorizar a realização do estudo de caso. Ao Gabinete e Coordenação de Gestão Científica e Tecnológica por possibilitarem meus estudos, como servidor do INPE.

Aos profissionais do INPE que foram entrevistados durante a pesquisa, pela disponibilidade e pelas preciosas contribuições ao assunto. Em especial a Luiz Antônio dos Reis Bueno, por toda a atenção dedicada em apoiar a pesquisa.

Aos colegas de trabalho e pós-graduação do INPE pelo companheirismo, interessantes discussões e ajudas ao longo da pesquisa, especialmente à Rutilene, Josiane e Dinah.

À minha esposa Fernanda, filha Maria Gabriela e toda a família, pelo apoio e compreensão diante de todo o esforço necessário para a condução do mestrado.

E finalmente, mas acima de tudo, a Deus pela providência e inspiração, e pela intercessão de Nossa Senhora em momentos críticos do mestrado.

RESUMO

Integração de sistemas é um elemento central do esforço de desenvolvimento de sistemas complexos e ocorre ao longo de todo o seu ciclo de vida. Visões de arquitetura podem ser utilizadas para organizar a análise de sistemas complexos e diferenciar as interações envolvidas na integração entre elementos destes sistemas. A escala de Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL) auxilia a tomada de decisões sobre a introdução de tecnologias no desenvolvimento de sistemas complexos. Embora seja utilizada há décadas, esta escala apresenta limitações relacionadas à representação da integração entre os elementos tecnológicos de um sistema. A escala de Níveis de Maturidade de Integração (IRL) visa enfrentar estas limitações. A escala IRL vem sendo elaborada na última década e sua aplicação tradicional possui oportunidade de melhoria no que concerne às diferentes interações envolvidas na integração de sistemas.

A fim de enriquecer a análise de sistemas complexos e visando esta oportunidade de melhoria, esta pesquisa relata o desenvolvimento de um método para aplicar a escala IRL a partir de visões de arquitetura, utilizando matrizes do tipo *Design Structure Matrix* (DSM) e *Domain Mapping Matrix* (DMM). Utilizando a metodologia *Design Science*, os resultados demonstram a aplicação da proposta teórica em estudo de caso de sistemas espaciais desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e obtém a validação pragmática por meio de entrevistas a um grupo de profissionais envolvidos no desenvolvimento destes sistemas. Os resultados também mostram a avaliação da própria escala IRL por parte destes entrevistados, e exploram como a aplicação desta escala poderia se relacionar com suas atividades no desenvolvimento de satélites do INPE. Esta pesquisa contribui com o avanço do conhecimento para a literatura da escala IRL, por meio da proposta teórica, resultados empíricos de aplicação, avaliação e validação relatados nesta dissertação. A pesquisa também contribui para o INPE no sentido de explorar como a escala IRL poderia se relacionar com as atividades do instituto, auxiliando no processo de tomada de decisões.

Palavras-chave: Engenharia aeroespacial. Engenharia de sistemas. Integração de sistemas. Níveis de maturidade de integração. Visões de arquitetura.

EVALUATING SPACE SYSTEMS INTEGRATION READINESS LEVELS USING ARCHITECTURE VIEWS

ABSTRACT

Systems integration is a central element of the complex systems development effort and occurs throughout almost its entire life cycle. Architecture views may be used to organize the analysis of complex systems and to differentiate the interactions involved in the integration between elements of these systems. The Technological Readiness Levels (TRL) scale supports the decision making regarding the introduction of technologies in complex systems. Although it has been used for decades, this scale presents limitations related to the representation of the integration between the technological elements of a system. The Integration Readiness Levels (IRL) scale aims to address these limitations. The IRL scale has been elaborated in the last decade and there is an opportunity to improve its traditional application in order to differentiate the interactions involved in systems integration.

Considering this gap, this research developed a method to apply the IRL scale using architecture views, through Design Matrix Matrix (DSM) and Domain Mapping Matrix (DMM), in order to enrich the analysis of complex systems. Supported by the Design Science method, results show the proposed method application in a case study with space systems developed by *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), and show the pragmatic validation for the method obtained through interviews with a group of professionals involved in these systems development. These interviews also evaluated the IRL scale itself, and explored how the scale could support satellite development activities at INPE. This research contributed to the IRL scale literature with the new method proposed, the case study empirical results, and the evaluation through interviews. This research contributed to INPE in exploring how the IRL scale could support the decision-making process for INPE's activities.

Keywords: Aerospace engineering. Systems engineering. Systems integration. Integration Readiness Levels. Architecture views.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 - Ilustração dos níveis de maturidade tecnológica e tipos de atividades de pesquisa e desenvolvimento.	9
Figura 3.2 – Modelo em “V” utilizado em engenharia de sistemas.	12
Figura 3.3 – Ilustração dos níveis de maturidade de integração.	15
Figura 3.4 – Exemplo de transformação da escala de maturidade de sistema.	16
Figura 3.5 – Ilustração dos passos para avaliação de maturidade de sistema.	30
Figura 3.6 – Exemplo de aplicação da avaliação de maturidade de sistema. ...	32
Figura 3.7 – Representação de dependências através de matrizes.	33
Figura 3.8 – Exemplo de aplicação da escala IRL em uma matriz DSM.	36
Figura 3.9 – Exemplo de aplicação da escala IRL com diferentes tipos de interações.	37
Figura 3.10– Exemplos de aplicações do diagrama N2.	39
Figura 3.11 – Uso da escala TRL em revisões de projetos na área espacial. ...	42
Figura 3.12 – Atividades de apoio a decisões técnicas utilizando a escala TRL.	42
Figura 4.1 – Planejamento do projeto de pesquisa.	45
Figura 5.1 – Ilustração do método proposto.	56
Figura 5.2 - Diagrama N2 do satélite SAT1.	63
Figura 5.3 – Matriz DSM representando as visões de arquitetura do satélite SAT1.	64
Figura 5.4 – Matriz DMM representando as visões de arquitetura do satélite SAT1.	65
Figura 5.5 – Avaliação da escala IRL do satélite SAT1 no momento T0.	70
Figura 5.6 – Avaliação da escala IRL do satélite SAT1 no momento T1.	71
Figura 5.7 – Avaliação da escala IRL do satélite SAT2 no momento T2.	72
Figura 5.8 – Avaliação da escala IRL do segmento SG2 após testes realizados.	73
Figura 5.9 – Avaliação da escala IRL de SG3 após testes realizados.	74

Figura 5.10 – Avaliação da escala IRL de SAT1 em T1 com matriz DSM.	76
Figura 5.11 – Avaliação da escala IRL de SAT1 em T1 com matriz DSM tradicional.....	77
Figura 5.12 – Facilidade para realizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura.	87
Figura 5.13 – Facilidade para visualizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura.	88
Figura 5.14 – Capacidade de ressaltar as interações entre os elementos do sistema.....	89
Figura 5.15 – Capacidade de ressaltar as múltiplas visões de arquitetura do sistema.....	90
Figura A.1 – Evolução de publicações relativas à escala TRL.....	116
Figura A.2 – Tipos de publicações relativas à escala TRL.....	117
Figura A.3 – Periódicos com mais publicações relativas à escala TRL.....	117
Figura A.4 – Disciplinas de publicações relativas à escala TRL.....	118
Figura A.5 – Principais autores de publicações relativas à escala TRL.	118
Figura A.6 – Principais países de origem de publicações relativas à escala TRL.	119
Figura A.7 – Principais instituições de origem de publicações relativas à escala TRL.	119
Figura A.8 – Rede de citações de publicações relativas à escala TRL.	120
Figura A.9 – Evolução de publicações relativas à escala IRL.	122
Figura A.10 – Tipos de publicações relativas à escala IRL.	123
Figura A.11 – Disciplinas de publicações relativas à escala IRL.....	124
Figura A.12 – Principais autores de publicações relativas à escala IRL.	124
Figura A.13 – País de origem de publicações relativas à escala IRL.....	125
Figura A.14 – Instituições de origem de publicações relativas à escala IRL. .	125
Figura A.15 – Rede de citações de publicações relativas à escala IRL.	126
Figura B.1 – Ilustração da apresentação utilizada na etapa de avaliação.....	130
Figura B.2 – Questionário utilizado na etapa de avaliação.	134

Figura C.1 – Possíveis relações da escala IRL com atividades do ciclo de vida de projetos do padrão ECSS.....	153
Figura D.1 – Modelo conceitual de uma descrição de arquitetura.....	165

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Níveis conceituais da escala <i>International Standards Organization's Open Systems Interconnect</i>	13
Tabela 3.2 - Características de CoPS e produtos de produção em massa.	18
Tabela 3.3 - Aplicação da escala TRL em revisões de projetos da NASA.	40
Tabela 5.1 – Artefatos existentes na literatura no início da pesquisa.	54
Tabela 5.2 – Artefatos propostos para tentar resolver o problema em questão.	55
Tabela 5.3 – Regras consideradas para a escala TRL por mudanças no sistema.	66
Tabela 5.4 – Avaliação da escala TRL de SAT1 no momento T0.	67
Tabela 5.5 – Regras consideradas para a escala IRL por mudanças no sistema.	68
Tabela 5.6 – Como a escala IRL poderia se relacionar com as atividades no projeto.	80
Tabela 5.7 – Tipos de aplicações da escala IRL que despertaram maior interesse.	82
Tabela 5.8 – Outras possíveis aplicações identificadas para a escala IRL.	83
Tabela 5.9 – Utilidade de aplicações numéricas derivadas das escalas de maturidade.	84
Tabela 5.10 – Comentários opcionais ao final da entrevista.	85
Tabela 5.11 – Potencial importância das capacidades de análise gráfica e numérica.	91
Tabela A.1 – Periódicos com publicações relativas à escala IRL.	123
Tabela B.1 – Dados dos profissionais entrevistados.	129
Tabela B.2 – Dados coletados referentes às perguntas com respostas de múltipla escolha.	138
Tabela B.3 – Dados coletados referentes às perguntas com respostas discursivas.	139

Tabela C.1 – Processos do ciclo de vida selecionados para cada nível IRL..	144
Tabela C.2 – Itens de informação selecionados para cada processo de ciclo de vida.....	146
Tabela C.3 – Itens de informação selecionados para cada processo de ciclo de vida.....	147
Tabela C.4 – Tipos de documentos encontrados no estudo de caso.....	150
Tabela D.1 – Tipos de modelos e sua correspondência na escala TRL.	161
Tabela E.1 – Definições, ilustrações e evidências necessárias da escala <i>Integration Readiness Levels</i>	168

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFRL	Air Force Research Laboratory
ATB	Avionics Test Bench
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite
CoPS	Complex Products and Systems
CSE	Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais
DMM	Domain Mapping Matrix
DoD	Department of Defense
DOE	Department of Energy
DSM	Design Structure Matrix
DT&E	Developmental Test and Evaluation
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EM	Engineering Model
EQM	Engineering Qualification Model
ETE	Engenharia e Tecnologia Espaciais
FM	Flight Model
GAO	Government Accountability Office
GSE	Ground Support Equipment
ICD	Interface Control Document
IDD	Interface Definition Document
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IID	Interface Identification Document
INCOSE	International Council on Systems Engineering
IRD	Interface Requirements Document
IRL	Integration Readiness Levels
ISO	International Organization for Standardization
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MDM	Domain Mapping Matrix
N2	Metodologia N-Squared

NASA	National Aeronautics and Space Administration
OSI	Open Systems Interconnect
OT&E	Operational Test and Evaluation
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PFM	Protoflight Model
QFD	Quality Function Deployment
QM	Qualification Model
SRA	System Readiness Assessment
SRL	System Readiness Levels
STM	Structural Thermal Model
SVF	Software Verification Facility
TRA	Technology Readiness Assessment
TRL	Technology Readiness Levels
V&V	Verificação e validação
VCB	Verification Control Board
VCD	Verification Control Document

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	6
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. Níveis de maturidade tecnológica.....	7
3.2. Níveis de maturidade de integração e de sistema	11
3.3. Arquitetura e integração de sistemas complexos.....	17
3.4. Avaliação de níveis de maturidade	26
3.5. Representação de dependências em sistemas complexos	32
3.6. Níveis de maturidade tecnológica em projetos de sistemas espaciais	40
4 METODOLOGIA	44
5 RESULTADOS.....	49
5.1. Desenvolvimento da teoria	49
5.1.1. Método proposto	55
5.2. Estudo de caso	60
5.2.1. Informações sobre o sistema	61
5.2.2. Mapeamento do sistema	62
5.2.3. Aplicação da escala TRL.....	65
5.2.4. Aplicação da escala IRL.....	68
5.2.5. Aplicação da escala SRL	77
5.3. Avaliação por entrevistas.....	79
5.3.1. Avaliação da escala IRL.....	79
5.3.2. Avaliação da aplicação a partir de visões de arquitetura	85
5.4. Discussão	91
5.4.1. Discussão sobre a escala IRL.....	92
5.4.2. Discussão sobre o método proposto	96
5.4.3. Explicitação de aprendizagens.....	101
6 CONCLUSÃO	103

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
APÊNDICE A – ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	116
A.1. Technology readiness level.....	116
A.2. Integration readiness level	122
APÊNDICE B – DADOS UTILIZADOS PELA PESQUISA	128
B.1 Dados dos entrevistados.....	128
B.2 Apresentação utilizada.....	130
B.3 Questionário utilizado	134
B.4 Dados coletados nas entrevistas	137
APÊNDICE C – CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCALA IRL.....	142
C.1. Lista de documentos para evidências da escala IRL.....	142
C.2. Relação com as normas do padrão ECSS	152
ANEXO D – CONTEÚDO DE NORMAS DE INTERESSE	155
D.1. Normas do sistema ECSS	155
D.2. Normas do sistema ISO / IEC / IEEE.....	163
ANEXO E – ESCALA DE NÍVEIS DE MATURIDADE DE INTEGRAÇÃO	167

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica da inovação no setor de Produtos e Sistemas Complexos (CoPS) é diferente de setores de produção em massa. CoPS são bens altamente customizados, de alto custo e intensivos em engenharia (HOBDA, 1998), normalmente produzidos para projetos únicos ou em pequenos-lotes, com ênfase de produção apoiada por metodologias como engenharia de sistemas e gestão de projetos. O sucesso de muitos sistemas depende principalmente de sua arquitetura (MAIER; RECHTIN, 2000), sendo que uma das principais funções de um arquiteto de sistema é decidir se e como integrar novas tecnologias na arquitetura do sistema (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016).

Integração de sistemas é um elemento central do esforço de desenvolvimento em engenharia de sistemas (SAGE; LYNCH, 1998). O trabalho técnico de integração ocorre em muitas fases de um projeto de desenvolvimento de sistema, incluindo as atividades que permitam identificar, definir e projetar, analisar, selecionar e verificar as interfaces do sistema (SAGE; LYNCH, 1998).

Um processo central em arquitetura de sistemas é a progressão, ou redução gradual da abstração, de modelos, critérios de avaliação, heurísticas e propósitos, desde as ideias iniciais até chegar aos processos mais formais e detalhados em diferentes domínios da engenharia (MAIER; RECHTIN, 2000). Visão de arquitetura é uma representação de um sistema sob determinada perspectiva de interesse, e é necessária porque os sistemas complexos tendem a ter modelos complexos e exigem um elemento organizador de nível superior (MAIER; RECHTIN, 2000). O arquiteto de sistemas projeta a visão do sistema e comunica essa visão entre as partes interessadas (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016). Ainda, visões de arquitetura são cada vez mais comuns em sistemas baseados em tecnologias da informação onde suas hierarquias de sistema podem ser mais complexas de se representar (MAIER; RECHTIN, 2000).

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 venha sendo utilizada há décadas, ela ainda apresenta desafios para refletir melhor a integração de elementos tecnológicos à arquitetura do sistema e sua aplicação possui outros desafios relacionados à complexidade de sistemas, planejamento em projetos, subjetividade e imprecisão da escala (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015). Métodos de avaliação de maturidade podem utilizar mais elementos da disciplina de verificação e validação de sistemas para diminuir a imprecisão e subjetividade da escala (JESUS; CHAGAS JUNIOR, 2017).

O novo cenário global do setor espacial apresenta fatores notáveis como a intensa inovação tecnológica, crescente globalização, empreendedorismo, proliferação de satélites cada vez menores, e modularização de produtos (FUTRON, 2014). Muitas técnicas para desenvolvimento de sistemas espaciais foram concebidas na época da corrida espacial, quando os projetos dispunham de grandes volumes orçamentários e maior continuidade no planejamento (HASTINGS, 2004; ROSS et al., 2004). Frente ao cenário atual de maiores incertezas tecnológicas, comerciais, políticas e de aplicação, as arquiteturas de sistemas espaciais devem enfrentar tais incertezas (HASTINGS; WEIGEL; WALTON, 2003), e metodologias de avaliação de maturidade tecnológica devem ser atualizadas (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015).

A escala de níveis de maturidade de integração (IRL) foi proposta para representar níveis de riscos associados à maturidade da integração entre dois ou mais elementos tecnológicos de um sistema (SAUSER et al., 2006) e tem evoluído ao longo da última década. Esta escala vem sendo tradicionalmente aplicada com o auxílio de uma matriz (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015; ISRACOI, 2017), estabelecendo apenas um nível de maturidade de integração entre cada par de elementos tecnológicos do sistema e não incorporando informações sobre os tipos de interfaces envolvidas na integração.

No entanto, sistemas complexos possuem interfaces de distintas naturezas (EISNER, 2005), que podem ser desenvolvidas por meio de diferentes pacotes

de trabalho no projeto (EISNER, 2008), e normalmente modelos são utilizados durante o desenvolvimento do sistema para verificar diferentes aspectos de sua arquitetura (BLANCHARD; FABRYCKY, 2006). Desta maneira, a integração entre dois elementos tecnológicos do sistema pode apresentar diferentes níveis de maturidade de integração em um determinado momento do projeto de desenvolvimento. Esta constatação foi confirmada nesta pesquisa, e também pela recente pesquisa de Ross (2018) que ainda está em processo de publicação.

Assim, o autor levantou a hipótese de que poderia ser útil aplicar a escala IRL a partir de diferentes visões de arquitetura, a fim de enriquecer a análise de sistemas complexos por meio de visões de arquitetura (MAIER; RECHTIN, 2000), e a fim de buscar uma solução para a constatação do parágrafo anterior, já que as visões de arquitetura podem auxiliar a organizar as diferentes interações entre elementos de um sistema. A questão de pesquisa formulada foi: Como avaliar a maturidade de integração entre elementos tecnológicos a partir das diferentes visões de arquitetura de um sistema?

Visualizar arquiteturas através de maneiras complementares potencializa a análise de sistemas complexos (BROWNING, 2016). A representação de dependências em sistemas complexos, ou a visualização de sua arquitetura, pode ser realizada por meio de análise em um único domínio utilizando uma matriz *Design Structure Matrix* (DSM), entre diferentes domínios utilizando uma matriz *Domain Mapping Matrix* (DMM), ou mesmo através de combinação ou computação entre estas duas abordagens (MAURER; BRAUN; LINDEMANN, 2009). A literatura relacionada a estas matrizes (EPPINGER; BROWNING, 2012; BROWNING, 2016) aborda distintas aplicações que foram utilizadas nesta pesquisa.

Utilizando as considerações apresentadas nos parágrafos anteriores, a pesquisa realizou o desenvolvimento de um método complementar ao método atual da escala IRL (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017), a fim de potencializar a análise de sistemas complexos (HOBDAI, 1998). O método proposto contempla dois tipos de matrizes, DSM e DMM (EPPINGER;

BROWNING, 2012), que permitem a aplicação de maneira mais próxima do método atual da escala IRL, ou com maior nível de abstração para visualizar a integração de maneira holística (LANGFORD, 2013) com maior enfoque às visões de arquitetura (MAIER; RECHTIN, 2000). O método proposto poderia ser aplicada para análise de sistemas que já possuam visões de arquitetura, ou mesmo para sistemas que não possuam e que seja de interesse de análise estabelecer estas visões de arquitetura.

A pesquisa utilizou o método *Design Science* (SIMON, 1996; HEVNER et al., 2004; DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015), que busca atender não só ao rigor e à validade científica, mas também à validade pragmática do método proposto. Desta maneira, foi realizado estudo de caso com sistemas espaciais desenvolvidos pelo INPE, a fim de demonstrar a aplicação da escala IRL e do método proposto, e também de servir como base para as entrevistas de avaliação que foram realizadas com profissionais do INPE, que atuaram em distintas funções nos projetos de desenvolvimento dos satélites do estudo de caso.

As entrevistas de avaliação não só avaliaram a utilidade e eficácia do método proposto, mas também avaliaram a própria escala IRL e buscaram explorar como a aplicação da escala IRL poderia se relacionar com as atividades de desenvolvimento de satélites do INPE, a partir da perspectiva dos entrevistados. A importância de explorar este tópico advém do fato de que a escala IRL ainda não é utilizada de maneira sistemática no desenvolvimento de satélites do INPE, e estes dados empíricos poderão contribuir no sentido de melhor compreender as possíveis aplicações da escala IRL nas atividades desenvolvidas pelo instituto.

Além desta pesquisa desenvolvida, esta dissertação apresenta no Apêndice C considerações do autor sobre a relação da escala IRL com normas internacionais de interesse. Estas considerações apoiaram a aplicação da escala IRL nesta pesquisa, e também poderão apoiar outros praticantes da escala IRL. Uma das considerações é a proposta de quais tipos de documentos poderiam servir como evidências para avaliação da escala IRL, já que a escala

apresenta uma possível oportunidade de melhoria na definição de seus elementos, se comparada à maneira que a lista da escala TRL está estruturada (JESUS; CHAGAS JUNIOR, 2017). Outra consideração é a relação da escala IRL com o ciclo de vida de projetos da *European Space Agency* (ESA), por meio da *European Cooperation for Space Standardization* (ECSS).

As próximas seções desta dissertação apresentam os objetivos da pesquisa, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e conclusões.

2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa é propor um método para avaliar a maturidade de integração entre elementos tecnológicos a partir de visões de arquitetura de sistemas espaciais.

Os objetivos específicos são:

- 1) Desenvolver um método para avaliar a maturidade de integração entre elementos tecnológicos a partir de visões de arquitetura de sistemas, utilizando a escala IRL e matrizes de representação de dependências em sistemas complexos;
- 2) Demonstrar a aplicação do método proposto e da escala IRL em estudo de caso com sistemas espaciais desenvolvidos pelo INPE;
- 3) Avaliar a utilidade e eficácia da escala IRL através de entrevistas com profissionais do INPE e explorar como a escala IRL poderia se relacionar com as atividades de desenvolvimento de satélites do instituto;
- 4) Avaliar a utilidade e eficácia do método proposto através de entrevistas com profissionais do INPE;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma perspectiva histórica e conceitual das escalas de níveis de maturidade tecnológica, níveis de maturidade de integração e níveis de maturidade de sistema. Em seguida, são abordadas as principais práticas e tendências em relação à avaliação de níveis de maturidade. São identificados conceitos sobre arquitetura e integração de sistemas complexos, e principais tipos de representação de dependências em sistemas complexos. Ao final, são apresentadas aplicações atuais da escala TRL em projetos de sistemas espaciais. Parte desta revisão bibliográfica foi publicada em um periódico científico (JESUS; CHAGAS JUNIOR, 2018).

O Apêndice A apresenta a análise bibliométrica relacionada às escalas TRL e IRL, realizada para o período anterior a julho de 2017.

O Anexo D identifica e apresenta normas internacionais que podem apoiar o projeto de pesquisa, relacionadas aos assuntos de arquitetura, integração, documentação, interfaces, ciclo de vida de projetos, verificação e validação de sistemas.

3.1. Níveis de maturidade tecnológica

De acordo com Mankins (2009a), na década de 1970 a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) introduziu o conceito de *Technology Readiness Levels* (TRL), ou níveis de maturidade tecnológica, como uma escala interdisciplinar que permitisse melhorar a avaliação e comunicação em relação à maturidade de novas tecnologias.

O principal objetivo da escala TRL é auxiliar a tomada de decisão em relação à utilização de tecnologias no desenvolvimento de sistemas complexos. Quando uma tecnologia não está madura o suficiente, sua introdução em um sistema em desenvolvimento pode acarretar problemas no prazo, orçamento e

desempenho do projeto (MANKINS, 2009a; OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015).

A escala TRL foi modificada ao longo de suas décadas de existência. A escala foi desenvolvida para auxiliar a transição entre o desenvolvimento tecnológico e o desenvolvimento de missões espaciais (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989), no contexto em que a NASA estava fortalecendo seus processos organizacionais associados ao desenvolvimento tecnológico a fim de suportar os processos organizacionais relacionados ao desenvolvimento de missões espaciais (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989). Em 1995 a escala TRL foi fortalecida através da publicação pela NASA (MANKINS, 1995) de definições detalhadas de cada nível de maturidade tecnológica e exemplos de aplicação. Esta última versão da escala TRL considera nove níveis de maturidade tecnológica, que são crescentes à medida que a tecnologia se torna mais madura.

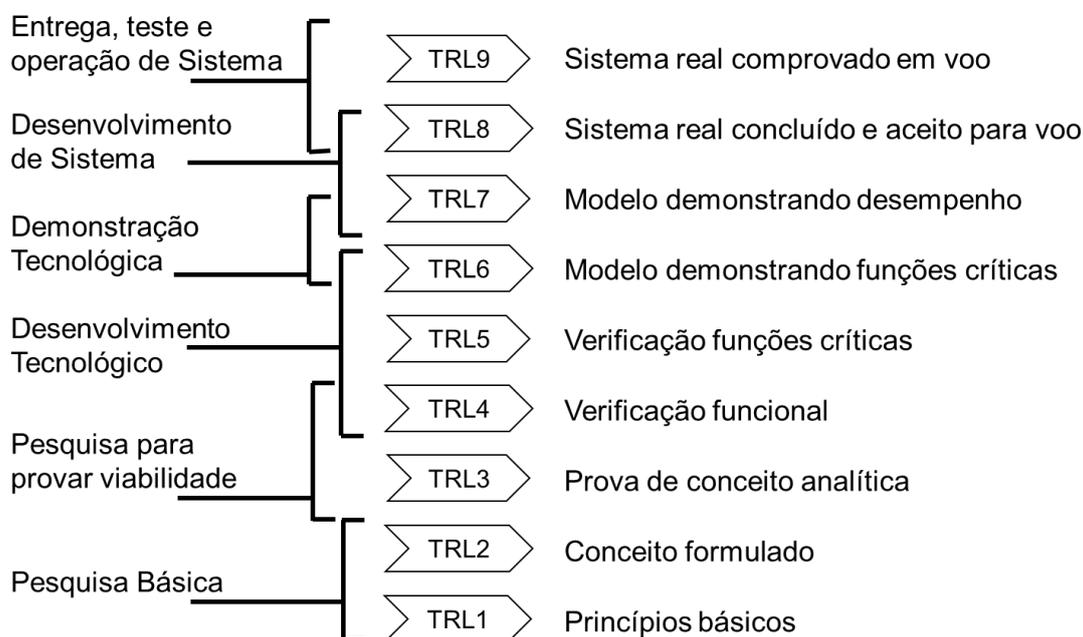
Nos Estados Unidos da América, *Government Accountability Office* (GAO) em 1999 recomendou ao departamento de defesa (*Department of Defense - DoD*) que adotasse a escala TRL da NASA ou escala similar, para melhorar seus resultados de pesquisa e desenvolvimento (GAO, 1999). O DoD adotou a escala TRL e realizou algumas modificações na escala para sua utilização (DOD, 2011). Também o departamento de energia (*Department of Energy – DOE*) adotou escala TRL com maiores modificações para sua utilização (DOE, 2015).

Na década de 2000, a escala TRL começou a ser utilizada em programas espaciais de outras regiões, como Europa e Japão (MANKINS, 2009a). Em 2013 foi publicada a norma ISO 16290:2013 “*Space systems -- Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment*” (2013), proposta pela ESA por meio da ECSS e discutida em nível internacional pelos membros participantes de comitê na *International Organization for Standardization* (ISO). No Brasil esta norma foi traduzida e publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 2015 (ABNT, 2015).

De acordo com ECSS (2017a), a escala TRL descrita na norma ISO 16290:2013 (2013) apresenta algumas diferenças em relação à escala descrita por Mankins (1995), que são: O nível 5 é um novo nível intermediário definido para quando *breadboards* em escala reduzida são utilizados; o nível 6 equivale ao nível 5 de Mankins; o nível 7 equivale ao nível 6 de Mankins; O nível 7 de Mankins trata de demonstração de protótipo em voo e não é utilizado na escala TRL da norma ISO 16290:2013 (2013).

A Figura 3.1 representa uma ilustração da escala TRL, apresentando uma descrição resumida dos níveis TRL a partir da norma ABNT NBR ISO 16290 (2015), e apresentando os tipos de atividades de pesquisa e desenvolvimento que costumam ser realizadas em cada nível de acordo com Mankins (2009a) e considerando as diferenças entre as escalas TRL descritas no parágrafo anterior.

Figura 3.1 - Ilustração dos níveis de maturidade tecnológica e tipos de atividades de pesquisa e desenvolvimento.



Fonte: Adaptada de Mankins (2009a) e ABNT NBR ISO 16290 (2015).

A Tabela D.1, no Anexo D, apresenta a correspondência entre alguns dos principais modelos utilizados para verificar sistemas espaciais e a escala TRL. É possível destacar algumas destas correspondências: modelo analítico para

se alcançar o TRL 3; maquete (*breadboard*) para o TRL 4; modelo de engenharia em menor escala para TRL 5; modelos de engenharia, estrutural e térmico para o TRL6; modelo de qualificação para o TRL 7; modelo de voo para TRL 8 e 9.

A definição de elemento tecnológico, ou simplesmente elemento, é um item ou objeto sob consideração para a avaliação de maturidade tecnológica (ABNT, 2015).

Segundo Cornford e Sarsfield (2004), a escala TRL é focada em uma determinada tecnologia e significativos desafios de integração podem ocorrer quando uma tecnologia é incluída em um sistema espacial. Assim, mesmo a tecnologia estando madura, inserir esta tecnologia em novas aplicações podem exigir esforços adicionais, e a escala TRL geralmente não consegue representar todo o esforço necessário para integrar a tecnologia em um sistema espacial.

Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) pesquisaram a utilização da escala TRL em diferentes setores industriais através de entrevistas e pesquisa em normas e diretrizes. Os autores constataram que a escala TRL é amplamente utilizada em diferentes indústrias de sistemas complexos e identificaram quinze desafios para melhorar a utilização da escala TRL, categorizados nas áreas de complexidade do sistema, planejamento e acurácia da avaliação.

Posteriormente, Tomaschek, Olechowski, Eppinger e Joglekar (2016) realizaram uma pesquisa com usuários da escala TRL com abrangência global em diferentes indústrias para identificar, dentre os quinze desafios identificados, quais são os mais prioritários. Os resultados da pesquisa indicam que os quatro desafios mais prioritários estão relacionados à complexidade de sistemas, e são eles: representação da integração entre tecnologias, interfaces, modificações no sistema e maturidade geral do sistema.

Estes quatro desafios identificados como prioritários são tratados neste projeto de pesquisa, e tratados pelas escalas de níveis de maturidade de integração e de sistema, que serão descritas a seguir.

3.2. Níveis de maturidade de integração e de sistema

Pesquisas iniciadas no *Stevens Institute of Technology*, lideradas pelo pesquisador Brian J. Sauser, propõem duas novas escalas de maturidade (SAUSER et al., 2006) para complementar a escala TRL como formas de superar os desafios oriundos da complexidade de sistemas, os mesmos desafios identificados por Tomaschek et al. (2016). As duas novas escalas propostas são: *Integration Readiness Levels* (IRL), ou níveis de maturidade de integração, e *System Readiness Levels* (SRL), ou níveis de maturidade de sistema.

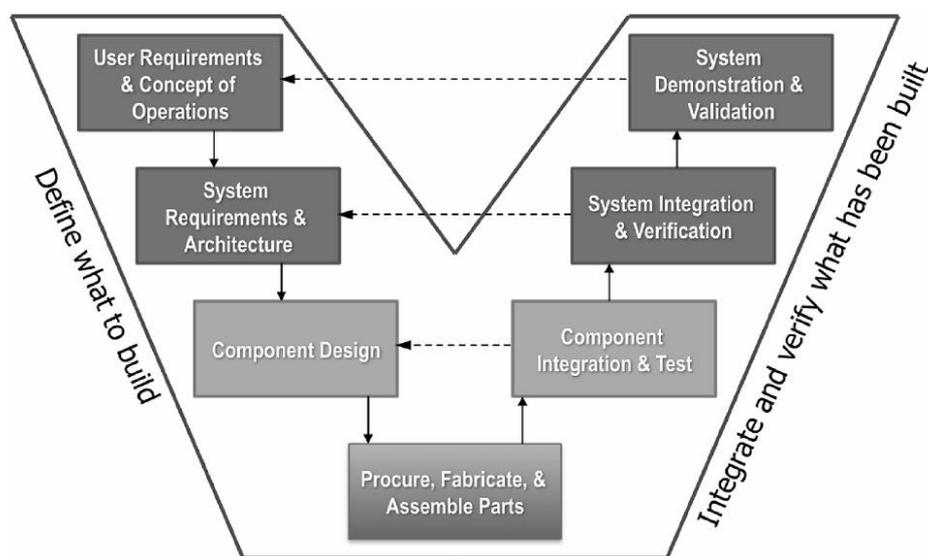
De acordo com a literatura, a escala IRL é uma medição sistemática das interfaces de interações compatíveis para várias tecnologias e da comparação consistente da maturidade entre distintos pontos de integração (SAUSER et al., 2006), ou de maneira mais resumida, a escala IRL é uma métrica para mensurar a maturidade da integração entre dois ou mais elementos de um sistema (ISRACOI, 2017).

A pesquisa relacionada à maturidade de integração entre elementos de um sistema também é justificada através da constatação de que as falhas de muitos sistemas espaciais estão relacionadas à integração de elementos do sistema (SAUSER; REILLY; SHENHAR, 2009).

Para Sauser, Ramirez-Marquez, Henry e DiMarzio (2008), integração de tecnologias é parte do ciclo de vida de engenharia de sistemas e demanda uma ferramenta de avaliação quantitativa para avaliar o risco da integração de tecnologias em um sistema complexo.

Sauser, Gove, Forbes e Ramirez-Marquez (2010) consideram a definição de integração de sistemas proposta por Buede (2000) como o processo de agregação do sistema a partir de seus elementos, que precisam ser agregados a partir de seus itens de configuração. Sauser et al. (2010) também consideram o processo de integração como a curva de subida em um modelo “V” utilizado em engenharia de sistemas, como representado na Figura 3.2. Posteriormente, a escala é modificada para representar também a definição da arquitetura, na descida do modelo em “V” de engenharia de sistemas.

Figura 3.2 – Modelo em “V” utilizado em engenharia de sistemas.



Fonte: Sauser et al. (2010).

Sauser et al. (2010) propõem que a escala IRL deve ser capaz de ser aplicada a diferentes níveis hierárquicos desde itens de configuração de mais baixo nível até ao nível de sistema, e para isso a escala deve representar a integração em termos suficientemente gerais, porém específicos o suficiente para a escala ser prática. Sauser et al. (2010) constatam que escalas para suportar a integração entre elementos do sistema têm sido extensivamente utilizados na indústria de computação, mas uma abordagem mais geral para integração de sistemas está menos desenvolvida.

A primeira versão da escala IRL (SAUSER et al., 2006) foi concebida a partir da escala *International Standards Organization's Open Systems Interconnect*

(ISO/OSI), utilizada em redes de computadores, que trata do nível de integração de dados em determinada interface entre um ou mais sistemas. A primeira versão da escala IRL apresentava sete níveis de maturidade, baseados na escala ISO/OSI. Os sete níveis conceituais da escala ISO/OSI, e também desta versão da escala IRL, são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Níveis conceituais da escala *International Standards Organization's Open Systems Interconnect*.

Nível	Conceito
1	Interface
2	Interação
3	Compatibilidade
4	Garantia de qualidade
5	Controle
6	Aceitação, traduz e estrutura a informação
7	Verificação e validação

Fonte: Adaptado de Sauser et al. (2006).

Sauser et al. (2010) incluíram dois novos níveis à escala IRL, em relação à versão de 2006. Os dois novos níveis são: o nível 8 relacionado à qualificação através de testes e demonstração, e o nível 9 relacionado à operação com sucesso em missões.

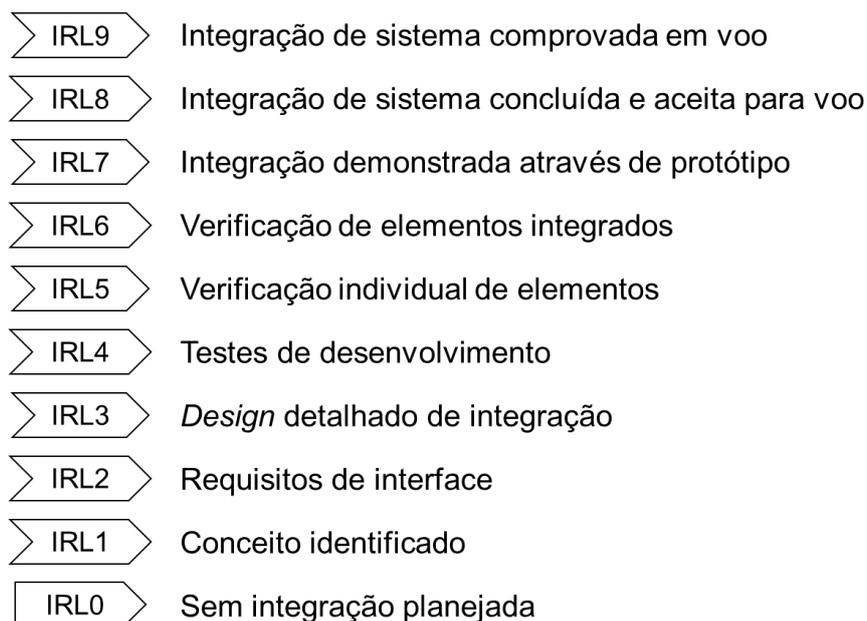
Posteriormente, a escala IRL foi modificada para refletir melhor o processo de desenvolvimento de sistemas e estar mais consistente com os fundamentos da escala TRL (AUSTIN; YORK, 2015, 2016). A Tabela E.1, no Anexo E, apresenta esta última versão da escala IRL.

A Figura 3.3 ilustra a escala IRL, apresentando uma descrição resumida de cada um dos níveis da escala, elaborada pelo autor. O autor sugere que a escala IRL poderia ser interpretada utilizando fundamentos da norma ECSS-E-ST-10-24C "*Interface Management*" (2015), que é apresentada no Anexo D.1. Esta interpretação seria da seguinte maneira: As etapas do processo de

gerenciamento de interfaces relativos à identificação, estabelecimento de requisitos e definição das interfaces, estariam relacionadas aos níveis 1 a 3 da escala IRL. O nível 0 da escala IRL representa que não há interface direta planejada entre os elementos do sistema em avaliação. Já os níveis 4 a 9 da escala IRL estariam relacionados à etapa de verificação e validação de interfaces, pois representam a verificação de interfaces por meio sob distintas condições de testes.

Ainda, como apresentado no Anexo D.1, a norma ECSS-E-ST-10-24C “*Interface Management*” (2015) propõe três passos para a verificação de interfaces: verificação precoce da compatibilidade, demonstração da conformidade individual das extremidades da interface, e verificação conjunta da interface em termos funcionais e de desempenho. O autor sugere que estes três passos estariam representados pela escala IRL da seguinte maneira: a verificação precoce estaria representada pelo nível IRL 4, a verificação individual de extremidades das interfaces representada pelo nível IRL 5, a verificação conjunta em termos funcionais representada pelo nível IRL 6 e a verificação conjunta em termos de desempenho representada pelo nível IRL 7. De maneira análoga à escala TRL, a escala IRL define testes em ambiente de laboratório para o nível IRL 4, portanto poderiam ser utilizados maquetes (*breadboards*) para estes testes; e ainda a escala IRL define testes em ambiente relevante para os níveis IRL 5 e 6, portanto poderiam ser utilizados modelos de sistemas espaciais como modelo de engenharia, estrutural e térmico para estes testes; enquanto que um modelo de qualificação seria necessário para realizar os testes necessários para o IRL 7. Já os níveis IRL 8 e 9 seriam análogos aos níveis da escala TRL 8 e 9, onde seria necessário a utilização de modelos de voo, ou mesmo *protoflight*, para os respectivos testes de aceitação e comprovação em operação.

Figura 3.3 – Ilustração dos níveis de maturidade de integração.



Fonte: Adaptado de Austin e York (2016).

A escala IRL normalmente é utilizada em conjunto com uma matriz DSM para representar a integração entre elementos do sistema (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015).

Em publicações atuais, *International Systems Readiness Assessment Community of Interest - ISRACOI* (2017) sugere que a aplicação da escala IRL suporta os engenheiros de sistemas a identificar áreas que podem exigir maiores esforços de desenvolvimento, além de representar uma medida dos riscos envolvidos no amadurecimento e na integração de elementos em um sistema, e pode ser aplicada para auxiliar tanto o desenvolvimento de novos sistemas quanto à inserção de novas tecnologias em um sistema.

A escala *System Readiness Levels*, ou SRL, é proposta para quantificar o nível de maturidade de um elemento em relação aos demais elementos que constituem um sistema, além de indicar quanto o sistema como um todo está integrado (SAUSER; RAMIREZ-MARQUEZ; TAN, 2008). A Equação 3.1 demonstra o cálculo do SRL composto para um sistema com ' n ' elementos, onde a matriz $[SRL]_{nx1}$ é obtida pela multiplicação da matriz $[IRL]_{nxn}$ que

representa a maturidade de integração entre os 'n' elementos e a matriz [TRL]_{nx1} que representa a maturidade tecnológica de cada um dos 'n' elementos. O SRL geral do sistema pode ser obtido através da média normalizada dos elementos da matriz [SRL]_{nx1}.

$$[SRL]_{nx1} = [IRL]_{nxn} \times [TRL]_{nx1} \quad (3.1)$$

A escala SRL pode ser transformada em uma escala de números inteiros que compreendem determinados intervalos do SRL calculado, representando o ciclo de vida de desenvolvimento de sistemas (AUSTIN; YORK, 2016), conforme ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Exemplo de transformação da escala de maturidade de sistema.

TRL	IRL	Composite SRL _i	Midpoint between levels	Composite SRL _i	SRL
9	9	1.000		0.914	9
8	8	0.828		0.750	8
7	7	0.672		0.601	7
6	6	0.530	0.467	0.467	6
5	5	0.404		0.349	5
4	4	0.293	0.245	0.245	4
3	3	0.197		0.157	3
2	2	0.116	0.084	0.084	2
1	1	0.051		0.000	1

Fonte: Austin e York (2016).

Algumas aplicações propostas para utilização das métricas IRL e SRL, juntamente com TRL, são: utilizar as métricas de maturidade como parâmetro de referência acoplado à gestão de valor agregado em projetos de desenvolvimento de sistemas (MAGNAYE et al., 2014); minimizar os custos de desenvolvimento de sistemas (MAGNAYE; SAUSER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2010) e associar a métricas de efetividade de *design* de sistemas como a *Equivalent System Mass* (SAUSER; MAGNAYE, 2010).

A escala IRL também está sendo aplicada na indústria de defesa (SAUSER et al., 2009), e customizada para refletir o processo de integração de sistemas para exploração petrolífera (YASSERI, 2013, 2016; KNAGGS et al., 2015).

Outras publicações comunicam a experiência e avaliação na aplicação da escala IRL (MCCONKIE et al., 2013; ATWATER; UZDZINSKI, 2014; PIRINEN; SIVLEN; MANTERE, 2014; SIVLEN; PIRINEN, 2014; LONDON et al., 2014; MANTERE, 2014; MANTERE; PIRINEN, 2014; PIRINEN, 2014; BAIOTTO et al., 2015; LEMOS; CHAGAS JUNIOR, 2016; MAPAMBA; CONRADIE; FICK, 2016; KNAGGS et al., 2017).

Kujawski (2013) realizou crítica à escala SRL, com o argumento de que a escala é um produto entre dois números ordinais, que representam as escalas TRL e IRL, e seu resultado deve ser analisado com precaução. Jimenez e Mavris (2014) realizaram críticas à escala IRL, quando a escala IRL ainda era baseada no padrão ISO/OSI de integração de dados, com argumento de que a escala era muito específica para a disciplina de gestão de dados, e sugeriram que apenas a escala TRL fosse utilizada. No entanto, a escala IRL já evoluiu para endereçar esta crítica.

3.3. Arquitetura e integração de sistemas complexos

Hobday (1998) define Produtos e Sistemas Complexos (CoPS) como produtos, sistemas, redes e construções de alto custo e intensivos em engenharia. CoPS tendem a ser fabricados em projetos únicos ou em pequenos lotes e a ênfase da produção tende a ser sobre design, gerenciamento de projetos, engenharia de sistemas e integração de sistemas. Exemplos de CoPS incluem satélites, redes de telecomunicações, simuladores de voo, motores de aeronaves, sistemas aviônicos, motores de trens, unidades de controle de tráfego aéreo, sistemas de redes elétricas, equipamentos de petróleo *offshore*, edifícios inteligentes e equipamentos de rede de telefonia celular. Devido a suas características de alto custo e customização, a dinâmica da inovação e a

natureza da coordenação industrial são diferentes em relação a outros tipos de produtos, especialmente os de baixo custo, produzidos em massa, baseados em componentes padronizados. A Tabela 3.2 apresenta as principais características e diferenças entre CoPS e produtos de produção em massa.

Tabela 3.2 - Características de CoPS e produtos de produção em massa.

Características	Sistemas complexos (CoPS)	Produção em massa
Produtos	Interfaces complexas, multi-funções, propriedades emergentes	Interfaces simples, poucas funções
Produção	Projeto / pequenos lotes	Grandes lotes, contínua
Processo de Inovação	Customização, trajetória de inovação <i>acordada ex-ante</i>	Formalizada, codificada, trajetória de inovação mediada pelo mercado
Coordenação Industrial	Aliança multi-firmas, estabilidade de longo prazo no nível de integração	Firma única, <i>design</i> dominante, <i>shakeout</i> da indústria
Estratégias competitivas	Gestão de alianças multi-firmas com base em projetos, capacitação em integração de sistemas	Foco em uma firma, capacitação em produção de alto volume

Fonte: Adaptado de Hobday (1998).

Hobday, Davies e Prencipe (2005) sugerem que integração de sistemas se tornou uma capacidade essencial para corporações modernas. Muitas das principais empresas globais estão desenvolvendo um novo modelo de organização industrial baseado na integração de sistemas. Em vez de realizar todas as tarefas produtivas internamente, as empresas estão criando capacidades para projetar e integrar sistemas, ao mesmo tempo em que gerenciam redes de fornecedores de componentes e subsistemas. Neste sentido, engenharia de sistemas e gerenciamento de projetos são disciplinas

necessárias para coordenar o esforço técnico e organizacional de integração de sistemas (EISNER, 2008).

Algumas aplicações de métricas de maturidade para integração de sistemas são analisar a profundidade da base tecnológica de integradores de sistemas (CHAGAS JUNIOR; LEITE; JESUS, 2017), categorizar (SHENHAR et al., 2005; LEMOS; CHAGAS JUNIOR, 2016) e apoiar (JESUS; CHAGAS JUNIOR, 2016) projetos de desenvolvimento de CoPS.

Eisner (2005) identifica na literatura fatores que contribuem para uma maior complexidade de sistemas, que são: tamanho, número de funcionalidades, operação paralela *versus* serial, número de modos de operação, ciclo de trabalho (dinâmico *versus* estático), operações em tempo real, nível de desempenho muito alto, número de interfaces, diferentes tipos de interfaces, grau de integração, comportamento não-linear e interação homem-máquina. Em relação aos diferentes tipos de interfaces, muitos sistemas têm uma interface mecânica e elétrica simples, como conectar componentes estéreo e conectar um cabo a um leitor de DVD, videocassete ou aparelho de TV, porém se adicionarmos requisitos de interface térmica, ambiental, de estrutura de dados e protocolos, o sistema torna-se ainda mais complexo.

Blanchard e Fabrycky (2006) propõem como principais fases do ciclo de vida de um sistema: *Design* Conceitual, *Design* Preliminar, *Design* e Desenvolvimento Detalhado, Produção / Construção, Utilização e suporte ao sistema, Descarte. As atividades de testes, avaliação e validação do sistema são realizadas progressivamente ao longo de seu desenvolvimento.

Segundo Blanchard e Fabrycky (2006), modelos são designados para representar um sistema em estudo e podem ser classificados como físicos, análogos, esquemáticos ou matemáticos. Os modelos físicos se parecem com o que eles representam, os modelos análogos se comportam como o original, modelos esquemáticos descrevem graficamente uma situação ou processo, e os modelos matemáticos representam simbolicamente os princípios de uma situação em estudo. Durante as fases iniciais do *design* detalhado, os

breadboards, os modelos de teste em bancada, os modelos de engenharia, o software de engenharia e os modelos de teste de serviço são construídos com a intenção de verificar determinados aspectos de desempenho ou de *design* físico. Testes formais e demonstrações são realizados durante a última parte do *design* detalhado quando equipamentos protótipos pré-produção, software, procedimentos formais e similares estão disponíveis.

Alguns exemplos de modelos utilizados no desenvolvimento de sistemas espaciais são apresentados na seção D.1 do Anexo D deste documento.

Ainda segundo Blanchard e Fabrycky (2006), a arquitetura básica do sistema é estabelecida com a definição de requisitos operacionais do sistema, o conceito de manutenção e suporte e a identificação e priorização dos critérios de *design*. Uma arquitetura de sistema trata da estrutura de sistema de alto nível, suas interfaces operacionais, perfis de utilização antecipados (cenários de missão) e o ambiente no qual ele deve operar, descrevendo como interagem esses vários requisitos para o sistema. Em seguida, a arquitetura funcional descreve o sistema em termos funcionais. A partir desta análise, através do processo de alocação de requisitos e da definição dos vários requisitos de recursos necessários para que o sistema atinja sua missão, a arquitetura física é definida.

Maier e Rechtin (2000) propõem que o refinamento progressivo do *design* é um dos padrões mais básicos de prática de engenharia. O processo de arquitetar sistemas passa pela progressão, ou redução gradual da abstração, de modelos, critérios de avaliação, heurísticas e propósitos, desde as ideias iniciais até chegar aos processos mais formais e detalhados em diferentes domínios da engenharia. Assim, a evolução e o desenvolvimento de modelos são tratados como o núcleo do processo de arquitetar sistemas. Os modelos representam e controlam a especificação do sistema, seu projeto e seu plano de produção. Mesmo após a entrega do sistema, a modelagem será o mecanismo para avaliar o comportamento do sistema e o planejamento de sua evolução. A ideia de visões de arquitetura é necessária porque os sistemas complexos tendem a ter modelos complexos e exigem um elemento

organizador de nível superior. Parte do papel do arquiteto de sistemas é determinar quais pontos de vista são mais críticos para o sucesso do sistema, criar modelos para essas visualizações e, em seguida, integrar, conforme necessário, para manter a integridade do sistema.

Rechtin (2000) avalia que decisões relacionadas à evolução ou criação de novas arquiteturas de sistemas influenciam diretamente na competitividade de organizações em atender às demandas de seus clientes, e conseqüentemente no sucesso destas organizações.

Maier e Rechtin (2000) constatam que infelizmente há muita variação no uso de termos importantes relativos a arquiteturas de sistemas, e utilizam a nomenclatura proposta pelo sistema normativo IEEE. Existem três termos que são importantes na criação de uma estrutura de modelagem: modelo, visão e ponto de vista. Um modelo é uma aproximação, representação ou idealização de aspectos selecionados da estrutura, comportamento, operação ou outras características de um processo, conceito ou sistema do mundo real. Uma visão é uma representação de um sistema em determinada perspectiva de interesse. Um ponto de vista é um padrão ou especificação para a construção de uma visão de arquitetura.

A norma ISO/IEC/IEEE 42010 “*Systems and software engineering - Architecture description*” (2011) aborda a criação, análise e sustentação de arquiteturas de sistemas, fornecendo definições básicas para a descrição de arquiteturas. Algumas das definições desta norma são apresentadas na seção A.2 em Anexo neste documento.

Em relação ao desenvolvimento de produtos industriais, Ulrich e Eppinger (ULRICH; EPPINGER, 2003) propõem que arquitetura de produto é a alocação de funcionalidades aos elementos físicos do produto. O propósito da arquitetura de produto é definir os blocos de construção básicos de elementos físicos do sistema em termos de o que eles fazem e quais são suas interfaces com o restante do produto. A definição da arquitetura permite o *design* detalhado e testes destes blocos de construção, sua alocação a equipes ou

fornecedores, de modo que o desenvolvimento de diferentes partes do produto possa ser feito simultaneamente. As decisões sobre a arquitetura e modularidade do produto influenciam diretamente em diferentes importantes aspectos do sucesso da organização, como: futuras mudanças no produto, variedade de produtos, padronização de componentes, desempenho de produto, manufatura, e gerenciamento do desenvolvimento de produtos (ULRICH, 1995; ULRICH; EPPINGER, 2003).

Crawley, Cameron e Selva (2016) propõem que uma definição simples de arquitetura é a descrição abstrata de entidades de um sistema e as relações entre si, e propõem que em sistemas de engenharia esta arquitetura pode ser representada como um conjunto de decisões. Estes autores propõem que arquitetar um sistema é uma composição de ciência e arte, com a racionalização de decisões através da formulação de como estas decisões podem impactar o desempenho do sistema. Estes autores sugerem ainda que a arquitetura de sistema pode ser utilizada para mapear e analisar um sistema existente, como uma engenharia reversa, ou ser utilizada na síntese de um novo sistema, como um método de engenharia direta.

O arquiteto de sistemas projeta a visão do sistema e comunica essa visão entre as partes interessadas e a equipe estendida de projeto (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016), assim o arquiteto de sistemas possui três papéis fundamentais: Reduzir a ambiguidade: definir os limites, metas e funções do sistema; Empregar criatividade: criar o conceito de sistema; Gerenciar a complexidade: escolher níveis de decomposição do sistema adequados para representar uma visão geral do sistema.

Crawley, Cameron e Selva (2016) avaliam que uma nova tecnologia é muitas vezes o cerne de um novo produto, e uma mudança na tecnologia é muitas vezes uma motivação principal para o desenvolvimento de uma nova arquitetura. Um dos papéis fundamentais do arquiteto é decidir se e como infundir uma nova tecnologia em uma arquitetura. É necessário um conhecimento profundo não só da tecnologia disponível e de sua maturidade, mas também do processo de integração no sistema e do valor que esta

integração irá criar. Ainda segundo estes autores, escala de maturidade tecnológica é útil para apoiar arquitetos de sistemas nestas decisões, ao representar os riscos relacionados à maturidade das tecnologias sendo consideradas.

Maier e Rechtin (2000) definem a profissão de arquiteto de sistemas como uma profissão que tem evoluído a partir da engenharia de sistemas, com o diferencial de saber trabalhar com conceitos de arquitetura de sistemas, já que a literatura destes conceitos tem evoluído. Os arquitetos de sistemas executam funções como: ajustar a forma e função do sistema, manter a integridade do sistema durante seu desenvolvimento, certificar que o sistema está pronto para uso, além de criar, desenvolver e demonstrar diferentes visões para o sistema.

Ross et al. (2004) e Hastings (2004) propõem que muitas técnicas para desenvolvimento de sistemas espaciais foram concebidas na época da corrida espacial, quando os projetos dispunham de grandes volumes orçamentários e maior continuidade no planejamento. Atualmente, além de enfrentar os complexos desafios técnicos na construção desses sistemas, os engenheiros também devem lidar com mudanças no contexto político e econômico que influenciam o *design* e desenvolvimento de sistemas espaciais.

Hastings et al. (2003) sugerem que as decisões em arquiteturas de sistemas devem ajudar a enfrentar estas incertezas, com ênfase em estratégias como flexibilidade e robustez, que pode levar os *designers* a soluções diferentes em relação a soluções que se concentram na otimização para atender a especificações ou critérios específicos.

Crawley et al. (2004) sugerem que arquiteturas de sistemas não são estáticas, mas evoluem por longos períodos à medida que as tecnologias amadurecem. Elas também evoluem durante o processo natural de concepção de um sistema. Esses padrões evolutivos são úteis para entender a importância da representação e das decisões envolvidas na arquitetura de um sistema.

Em linha com o contexto atual descrito que os sistemas e suas arquiteturas enfrentam, Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) constatam que a atualização da aplicação da escala TRL é importante, uma vez que o contexto atual de crescente complexidade dos sistemas, maior dinâmica de inovação, o uso do TRL em tomadas de decisões e uso em diferentes processos organizacionais são significativamente diferentes do contexto vivenciado pela NASA na década de 1970, quando da criação da escala TRL original.

Já em relação à integração de sistemas, a literatura e normatização de engenharia de sistemas possui uma noção comum para a definição de integração de sistemas como o processo de montar e integrar elementos de níveis hierárquicos menores, sucessivamente em níveis hierárquicos maiores, até a realização do sistema e suas funcionalidades desejadas (BUEDE, 2000; DOD, 2017; ECSS, 2017b; IEEE; IEC; ISO, 2007; INCOSE, 2006; KOSSIAKOFF et al., 2011; NASA, 2017; PETERSON; RODBERG, 2005). A norma ISO/IEC 26702-2007 IEEE 1220-2005 “*Standard for Systems Engineering - Application and Management of the Systems Engineering Process*” (2007) adiciona que para realizar a integração de elementos em um sistema, o projeto e a lógica de interfaces destes elementos devem ser satisfeitos.

Para Sage e Lynch (1998), a integração dos parâmetros técnicos e a compatibilidade das interfaces geralmente são assumidas como um esforço técnico realizado durante as últimas partes do ciclo de vida do desenvolvimento do produto. No entanto, se isso não for planejado adequadamente nas fases de definição e nas partes iniciais da fase de desenvolvimento, é provável que seja difícil realizar a integração perto do final da fase de desenvolvimento. Para realizar a engenharia concorrente e desenvolver simultaneamente diferentes partes do sistema, deve-se realizar esforços iniciais na arquitetura de sistemas e particionamento do sistema, e depois é necessária uma etapa de integração explícita destas partes do sistema. Se considerarmos que a análise, definição, *design* e controle de requisitos de interface são todos esforços de integração, a

integração do produto ocorre em quase todas as etapas do ciclo de vida de desenvolvimento de sistemas, e não apenas em suas últimas etapas.

Os termos verificação e validação são frequentemente utilizados com significados amplamente distintos (SELLERS et al., 2009). A atividade de verificação confirma que o sistema atende aos requisitos técnicos e é aplicada em muitos níveis na estrutura hierárquica do sistema, enquanto a validação confirma que o sistema atende às expectativas das partes interessadas e normalmente é realizada nos níveis mais altos da estrutura hierárquica do sistema (LARSON et al., 2009). A verificação e validação de projetos englobam uma ampla variedade de atividades altamente inter-relacionadas que visam responder a várias questões-chave ao longo de todo o ciclo de vida da missão (LARSON et al., 2009). Atividades de verificação e validação (V&V) inadequadamente planejadas ou mal executadas têm sido o cerne de muitas falhas de sistemas espaciais (LARSON et al., 2009).

Em sua proposta de teoria geral de integração de sistemas, Langford (2013) propõe que integração é a abordagem de construir ou criar um todo a partir de partes, e é mais do que simplesmente combinar ou montar estas partes. Muitos esforços de integração de sistemas sofrem alterações de requisitos por uma variedade de razões, e embora existam inúmeras estratégias para resolver esses problemas de integração de sistemas, é custoso e demorado planejar e integrar qualquer parte do sistema como “parte-a-parte”, pois os problemas persistem (RAMAMOORTHY et al., 1992). O conceito de integração proposto por Langford (2013) expressa integração de artefatos como “parte-ao-todo-esperado”, e não “parte-a-parte”. Por exemplo, para integrar as partes A e B e chegar ao sistema C: Planejando e integrando a Parte A com a forma que o sistema C deve se comportar, e depois a Parte B com a forma que o sistema C deve se comportar, é mais eficaz do que integrar a Parte A à Parte B para alcançar o sistema C. Se a Parte A não está disponível, a Parte B ainda pode ser integrada com os comportamentos de C para mostrar como a Parte A irá (e deve) se comportar. A aplicação deste conceito de integração de sistemas, “parte-ao-todo-esperado”, ilustra o pensamento holístico, onde as questões que

devem ser tratadas para o planejamento da integração do sistema poderiam ser realizadas independentemente da situação de desenvolvimento das partes individuais, ou seja, dos elementos do sistema.

Zandi (1986) sugere que a ciência e a engenharia devem fazer uso do pensamento sistêmico, considerando que um sistema é mais do que a soma de suas partes, possuindo propriedades emergentes. Crawley, Cameron e Selva (2016) propõem que emergência se refere ao que aparece, materializa ou aflora quando um sistema opera, ou em outras palavras as funções que emergem quando um sistema opera. As funções emergentes podem ser classificadas como desejadas ou indesejadas, e antecipadas ou não-antecipadas (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016). Sillitto (2005) propõe que engenharia de sistemas poderia ser definido como o gerenciamento de propriedades emergentes, tal a importância das propriedades emergentes no gerenciamento de um sistema.

3.4. Avaliação de níveis de maturidade

De acordo com Mankins (2009a), 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 (2009a) propõe o conceito de *Technology Readiness Assessment* (TRA), ou avaliação de maturidade tecnológica, como método utilizado para realizar o processo de avaliação de níveis TRL. Para Mankins (2009a), um TRA rigoroso deve incluir evidências claras de que o TRL declarado foi alcançado - como fotos de um *breadbord* no laboratório, dados quantitativos de testes de verificação, entre outras evidências.

Os principais métodos utilizados 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; 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; 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. Segundo este autor, a principal aplicação da escala TRL neste caso foi orientar a transição entre programas de desenvolvimento tecnológico para utilização em sistemas operacionais. Vale observar que esta aplicação faz sentido no contexto onde os processos organizacionais associados ao desenvolvimento tecnológico suportam os processos organizacionais relacionados ao desenvolvimento de missões espaciais (SADIN; POVINELLI; ROSEN, 1989).

De maneira similar à AFRL (NOLTE; KENNEDY; DZIEGIEL, 2003), o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) desenvolveu um processo de TRA (FRERKING; 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 das 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 (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 é constituída predominantemente por elementos da disciplina de verificação de sistemas espaciais, acompanhados por seus respectivos requisitos de desempenho e situação de definição da tecnologia.

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 compromissos significativos de recursos financeiros. Algumas das melhores práticas de TRA descritas são:

- Entender quais evidências são necessárias para a escala TRL e qual o ambiente operacional no qual a 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;
- Os processos de avaliação devem ser confiáveis e apoiados por artefatos e informações claras, tais como documentos de requisitos, análises, relatórios de testes e considerações de testes ambientais;
- Obter informações de suporte e evidências necessárias para cada nível TRL é fundamental. 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;

- Incluir informação sobre a 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 (2017a) 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 (2013) como base de definições para a escala TRL.

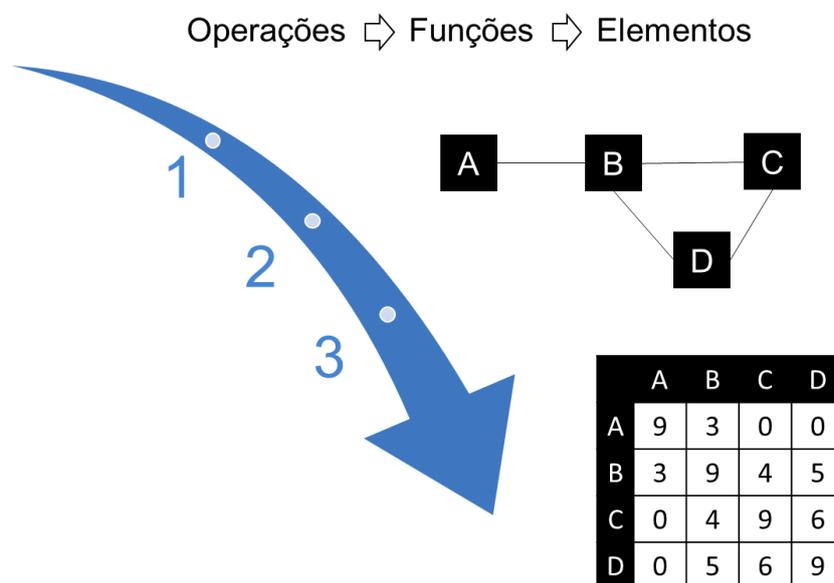
Em relação à escala IRL, Sauser et al. (2010) estabeleceram critérios de decisão para apoiar a avaliação em relação a cada nível de maturidade de integração IRL. Os critérios foram baseados em duas fontes: a primeira fonte foi avaliação de normas, pesquisas e outros documentos relativos à engenharia 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, em anexo na Tabela E.1. 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.

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 (JESUS; CHAGAS JUNIOR, 2017). Em comparação com a escala TRL, embora a escala IRL apresente uma lista de critérios como evidências necessárias, estes critérios 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.

O processo de avaliação integrado das escalas de maturidade TRL, IRL e SRL é tratado como *System Readiness Assessment* (SRA), ou avaliação da maturidade de sistema (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017). Este método considera três passos para sua implementação, conforme ilustrado pela Figura 3.5, e que serão descritos a seguir.

Figura 3.5 – Ilustração dos passos para avaliação de maturidade de sistema.



Fonte: Produção do autor, baseado em Austin e York (2016).

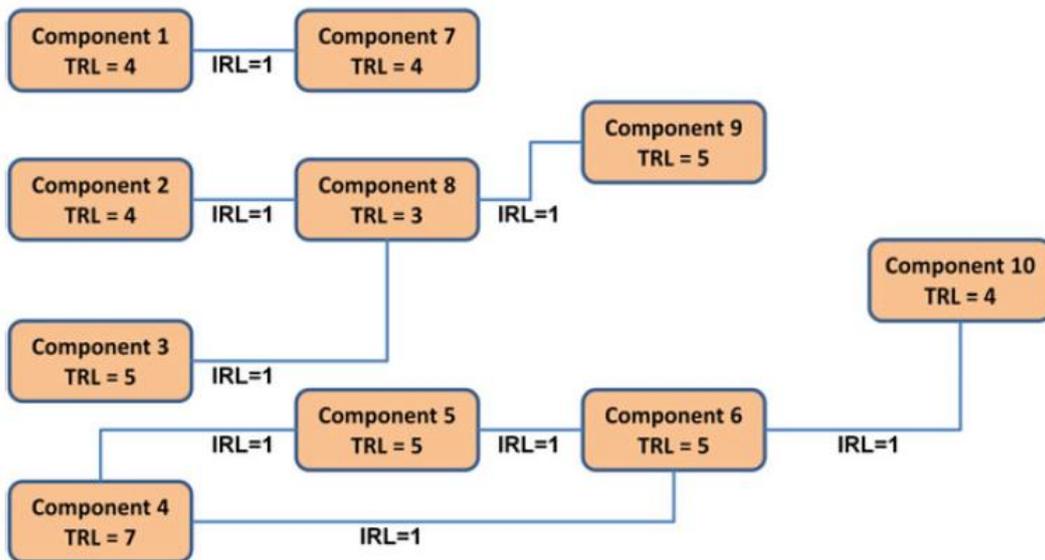
O primeiro passo é a coleta de informações sobre o sistema a fim de compreendê-lo e delimitá-lo. O segundo passo (AUSTIN; YORK, 2015, 2016;

ISRACOI, 2017) é mapear o sistema a partir de suas camadas de arquitetura. O mapeamento do sistema fornece uma compreensão de relações entre as diferentes camadas da arquitetura. O nível hierárquico mais alto deste mapeamento é baseado nos requisitos e atividades operacionais. Em seguida são mapeadas as funções que acompanham essas atividades operacionais. Os elementos do sistema que executam essas funções são identificados. Por sua vez, os elementos são compostos por tecnologias. É proposto que sejam utilizados diagramas de conexão a fim de representar as interfaces entre os elementos do sistema, de maneira a auxiliar a compreensão das interações entre os elementos do sistema. A Figura 3.6 ilustra um exemplo de aplicação deste mapeamento proposta na literatura (AUSTIN; YORK, 2016).

O terceiro passo (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017) é realizar avaliações interativas, utilizando uma matriz quadrada para representar as interações entre os elementos do sistema e associar a avaliação da escala IRL para cada uma destas interações.

Figura 3.6 – Exemplo de aplicação da avaliação de maturidade de sistema.

Operational Activities	Service Functions (Level 1)	Service Functions (Level 2)	System Components	TRL	System Technologies	TRL
A2.1.1 Activity	1. Service Function	1.1 Service Function	Component 1	4	System Technology	5
A2.1.2 Activity					System Technology	5
A2.1.3 Activity		1.2 Service Function	Component 2	4	System Technology	6
A2.1.4 Activity					System Technology	4
A2.1.6 Activity					System Technology	7
A2.2.1 Activity					System Technology	5
A2.2.2 Activity	Component 3	5	System Technology	6		
A2.2.3 Activity				System Technology	5	
A2.2.4 Activity				System Technology	7	
A2.2.5 Activity	Component 4	7	System Technology	7		
				System Technology	7	



O exemplo ilustra a decomposição das camadas de arquitetura em atividades operacionais, funcionalidades e elementos do sistema, e ilustra o mapeamento das interfaces entre os elementos do sistema.

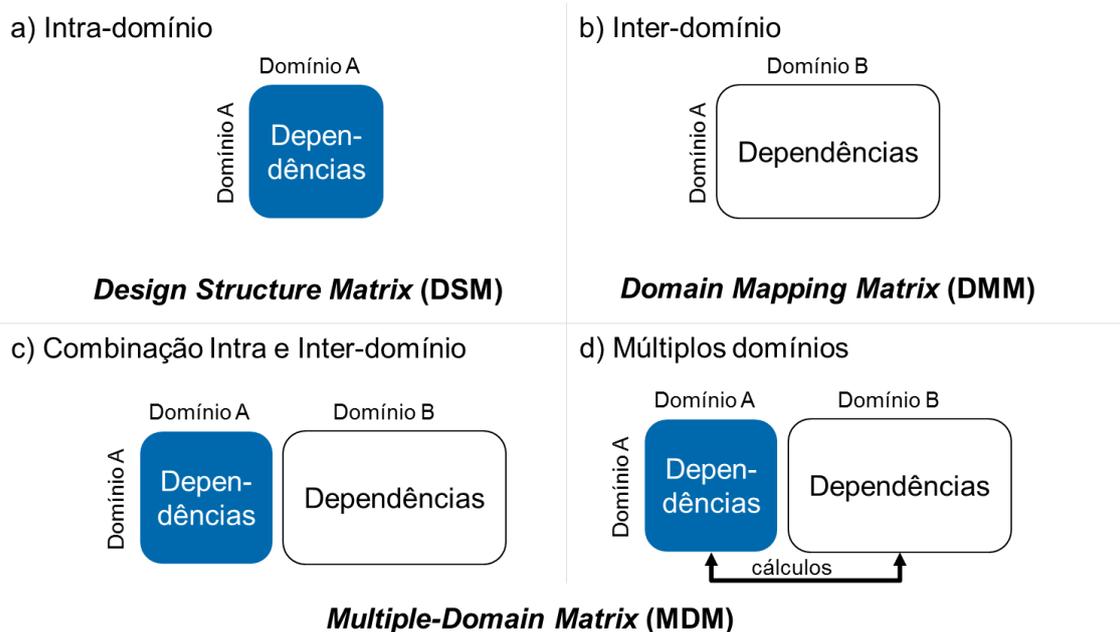
Fonte: Austin e York (2016).

3.5. Representação de dependências em sistemas complexos

Maurer, Braun e Lindeman (2009) sugerem que a visualização baseada em matriz para representar dependências em sistemas complexos pode ser

classificada pela quantidade de tipos de elementos envolvidos, como representado na Figura 3.7. Enquanto algumas abordagens se concentram na representação (e análise) entre elementos do mesmo tipo (por exemplo, dependências nos elementos do produto), outros consideram ligações entre dois tipos (por exemplo, dependências entre os requisitos do cliente e as funções do produto). Na primeira abordagem, as matrizes relacionadas podem ser definidas como intra-domínio. O rótulo "domínio" descreve o tipo de elemento, por exemplo o "Elementos do produto". Na segunda abordagem, as matrizes são referidas como matrizes inter-domínio. Abordagens mais abrangentes levam em conta ainda mais domínios pela combinação sequencial de matrizes intra e inter-domínio. Finalmente, uma *Multiple-Domain Matrix* (MDM) aplicam cálculos entre matrizes combinadas e podem fornecer visualizações específicas em um sistema modelado.

Figura 3.7 – Representação de dependências através de matrizes.



Fonte: Adaptado de Lindemann, Maurer e Braun (2009).

De acordo com Browning (2016), o *Design Structure Matrix* (DSM), também chamada de matriz de estrutura de dependência, tornou-se uma estrutura de modelagem amplamente utilizada em muitas áreas de pesquisa e prática. O DSM traz vantagens de simplicidade e concisão na representação e, suportado

por análises apropriadas, também pode destacar padrões importantes em arquiteturas de sistemas (estruturas de *design*), como módulos e ciclos. DSM é uma matriz quadrada onde as células diagonais normalmente representam os elementos do sistema e as células fora da diagonal representam relações (tais como dependências, interfaces, interações, etc.) entre os elementos.

Browning (2016) constata que o uso do DSM levou ao desenvolvimento de matrizes de mapeamento de domínio (DMMs) e matrizes multidomínio (MDMs), que ampliaram as aplicações e a capacidade de análise da modelagem de sistemas complexos através de matriz, proporcionando análises complementares do sistema. Constata-se que estas novas capacidades são cada vez mais úteis e importantes nesta época de projetos, produtos, processos, organizações e outros sistemas cada vez mais complexos.

Eppinger (1997), Pimmler e Eppinger (1994) propõem estender a aplicação do DSM para representar diferentes tipos de interação entre os elementos de um sistema, como interação espacial, transferência de energia, informação e matéria. Esta representação é realizada através da inserção de uma matriz 2x2 dentro de cada célula do DSM, para representar os quatro tipos de interação para cada interação entre elementos do sistema.

As matrizes DSM também podem apresentar elementos distintivos, como cores ou outros elementos gráficos, para complementar as interações entre os elementos do sistema com outros dados de interesse (EPPINGER; BROWNING, 2012).

Danilovic e Browning (2007) propõem uma abordagem para usar uma *Domain Mapping Matrix* (DMM) para comparar dois DSMs de diferentes domínios. Um DMM é uma matriz retangular ($m \times n$) que relaciona dois DSMs, onde m é o tamanho do DSM1 e n é o tamanho do DSM2. A análise do DMM complementa as análises tradicionais do DSM. Alguns dos benefícios da análise DMM são: representar melhor a dinâmica de desenvolvimento de produtos, mostrar a rastreabilidade das interações em diferentes domínios e melhor comunicação

entre uma variedade de participantes do projeto com diferentes pontos de vista ou interesses.

De acordo com Maurer, Braun e Lindeman (2009), o *Multiple-Domain Matrices* (MDM) consiste em matrizes intra e inter-domínio que permitem a modelagem de dependências dentro e entre elementos pertencentes a vários domínios. Além disso, as visualizações específicas do sistema podem ser derivadas por análise computacional de dependências indiretas no MDM.

Ainda segundo Maurer, Braun e Lindeman (2009), a visualização através de matrizes intra e inter-domínio combinadas representa um aprimoramento combinatório dos tipos de DSM e DMM. Por exemplo, o *House of Quality*, parte integrante do método *Quality Function Deployment* (QFD), combina matrizes inter e intra-domínio para capturar vários aspectos do sistema (domínios) simultaneamente. A forma básica do *House of Quality* contém uma matriz intra-domínio e três matrizes inter-domínio que ligam os requisitos do cliente, os requisitos técnicos, os critérios e a avaliação técnica.

De acordo com Akao (1990), o QFD fornece métodos específicos para garantir a qualidade ao longo de cada etapa do processo de desenvolvimento do produto, começando pelo *design*; em outras palavras, trata-se de um método para desenvolver um *design* de qualidade voltado para satisfazer o consumidor e, em seguida, traduzir as demandas dos consumidores em metas de *design* e pontos importantes de garantia de qualidade a serem utilizados ao longo da fase de produção.

O QFD é apontado como ferramenta de suporte à arquitetura de sistemas (MAIER; RECHTIN, 2000), pois ao modelar o refinamento gradual dos objetivos do cliente até chegar em parâmetros de engenharia, o QFD exhibe de certa maneira a progressão de refinamento e avaliação apontada como o princípio organizador da arquitetura de sistemas. O QFD também é apontado como ferramenta de suporte à engenharia de sistemas (ARMSTRONG JUNIOR, 2009) ao apoiar a identificação de requisitos e suportar o *design* progressivo e iterativo em engenharia de sistemas. No gerenciamento de projetos, o QFD

pode ser utilizado no desdobramento sucessivo acompanhando a estrutura analítica do projeto, auxiliando o gerenciamento da qualidade e riscos do projeto (CARVALHO; RABECHINI JUNIOR, 2011).

Uma matriz DMM que mapeia a progressão de necessidades de clientes a parâmetros de engenharia é em essência uma matriz QFD (BROWNING, 2016).

Publicações recentes sobre a escala IRL utilizam uma matriz DSM para mapear a arquitetura de sistema e aplicar a escala (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015). A Figura 3.8 ilustra um exemplo de aplicação da escala IRL através de uma matriz DSM.

Figura 3.8 – Exemplo de aplicação da escala IRL em uma matriz DSM.

Components	TRL	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
Host (riser flange for spool)	5	A	A	4	4																	
5" spool	4	B	4	B		4																
10" spools (x 2)	4	C	4		C	4																
Flange (to SSIV end)	5	D		4	4	D	4															
Flange (on spool)	5	E				4	E	5														
Piping	5	F					5	F	4	4		5										
SSIV (valves)	5	G						4	G													
SSIV structure	5	H						4		H	5											
SSIV foundation	4	I								5	I											
Connectors (on SSIV)	5	J						5				J	4									
Connectors (x 3 on pipes)	5	K										4	K	5			5					
5" gas lift	4	L											5	L	5							
5" FTA	5	M											5	M	4	5						
5" spool	4	N													4	N					5	
Foundations for 5" FTA	4	O												5		O						
10" pipelines (x 2)	4	P										5					P		5			
10" spools (x 2)	4	Q																Q	5		5	
10" FTA (x 2)	4	R															5	5	R		5	
Foundations for 10" FTA	4	S																		5	S	
Connectors (female x 3)	4	T													5					5		T

A matriz DSM apresenta um sistema utilizado no setor de exploração petrolífera, cujos elementos são descritos na primeira coluna. Os resultados da aplicação da escala IRL se encontram nas células da matriz.

Fonte: Adaptado de Yasseri (2016).

A pesquisa de Ross (2018) está em processo de publicação em uma revista científica, e foi tornada pública após a execução da pesquisa descrita nesta dissertação, disponibilizada aos membros do grupo de pesquisa internacional ISRACOI. A pesquisa de Ross (2018) apresenta a aplicação da escala IRL

estabelecendo diferentes valores da escala IRL para cada uma das diferentes interações que existem entre os elementos do sistema que estão sendo analisados. A pesquisa de Ross (2018) propõe a separação dos tipos de interações entre os mesmos elementos do sistema e identificação dos tipos de interações através do uso de legendas dentro de cada célula de uma matriz DSM, como ilustra a Figura 3.9.

Figura 3.9 – Exemplo de aplicação da escala IRL com diferentes tipos de interações.

	LSS	BCS	BD	T _{Iws}	E _{Iws}	C	T _{pl}	E _{pl}	O	P	Atm	Targ	LWS	Plat
LSS	T=4 M=3	O=5 M=5 A=5	X	D=1	D=1	D=2	X	X	X	D=1	X	X	M=1	X
BCS	D=5 A=5	T=4, M=4 A=1	D=2, A=1	D=1	D=1	D=2	X	X	X	D=1	X	X	M=1	M=2
BD	X	D=2 A=1	T=4 M=4	D=1	D=1	D=2	X	X	X	D=2	O=4, M=3	X	M=0	M=0
T _{Iws}	T=2 A=1	T=1 A=1	T=0 A=1	T=1, M=1	T=0	T=1	T=0	T=0	X	D=0	X	X	M=2	X
E _{Iws}	E=2	E=2	E=2	E=2		E=2	X	D=0	X	D=0	X	X	M=1	X
C	C=2	C	C	C	C		D	D	D	D	X	X	X	X
T _{pl}	X	X	X	T	X	D		D	X	D	X	X	X	X
E _{pl}	X	X	X	X	E	D	E		X	D	X	X	X	M
O	X	X	X	X	X	C	X	X		D	X	X	X	M
P	C=1	C=1	C	C	C	C	C	C	C		X	X	C	C
Atm	X	X	A M	X	X	X	X	X	X	X		M O	X	M A
Targ	X	X	X	X	X	X	X	X	D	X	M O		X	X
LWS	M=1	M=1	M	M	M	M	X	X	X	X	X	X		M
Plat	X	X	X	X	X	X	M	M	M	X	M	X	M	

M, mechanical; A, acoustic or vibration; O, optical; P, policy, safety, logistics, range, environment; E, electrical power; T, thermal; X, no direct interface; C, control signal or constraint; D, diagnostic or information signal; N, penetration or pass-through.

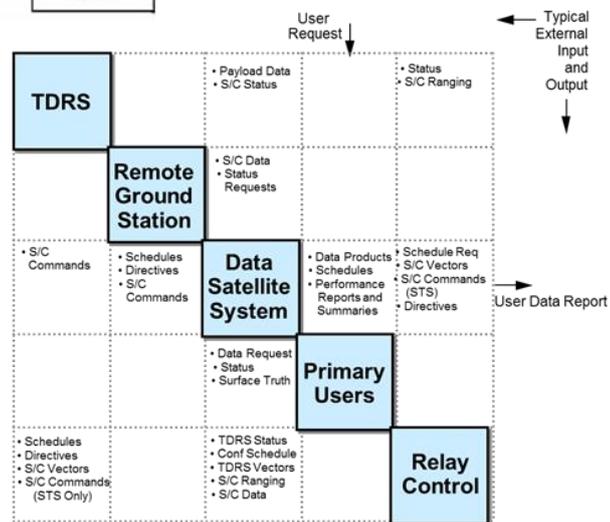
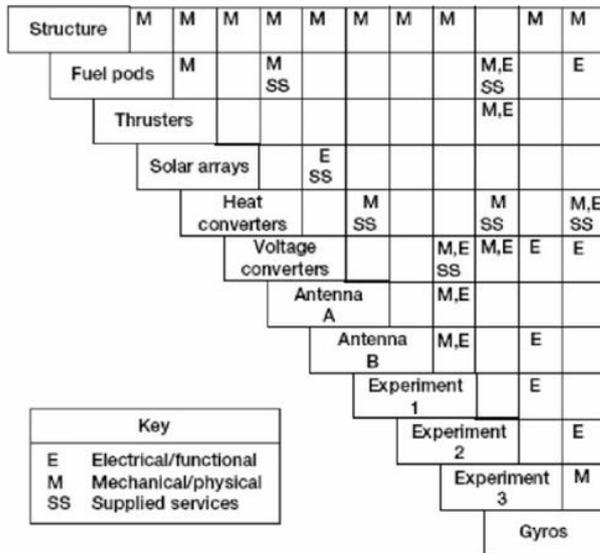
A matriz DSM apresenta um sistema aeroespacial, cujos elementos são identificados nas colunas e linhas da matriz. Nas células da matriz, as letras representam os tipos de interações entre os elementos, e os números representam os resultados da aplicação da escala IRL para cada interação entre os elementos do sistema.

Fonte: Ross (2018).

Em relação à representação da maturidade de um sistema, Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) sugerem que, em lugar de um número simples para descrever a maturidade de um sistema complexo, poderia ser útil uma visualização aprimorada com todas as informações de TRL, e talvez IRL, dos elementos do sistema. O motivo desta sugestão, segundo Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015), é que uma visualização concisa e completa da maturidade das partes de um sistema fornece ao gerente uma compreensão da maturidade geral deste sistema.

Em relação à representação de interfaces de sistemas complexos, o diagrama *N-Squared* (N2) é uma ferramenta bastante utilizada para representar as interfaces de um sistema (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016; LALLI; KASTNER; HARTT, 1997; LARSON et al., 2009; NASA, 2017). Os elementos ou funções do sistema são colocados na diagonal, enquanto que as demais células na matriz $N \times N$ representam as entradas e saídas das interfaces, sendo as saídas representadas em linhas e as entradas em colunas. Alternativamente, as interfaces podem ser representadas sem polarização, ou seja, sem a distinção entre entradas e saídas. O diagrama N2 pode ser aplicado a níveis hierárquicos do sistema sucessivamente mais baixos, e também pode representar as interfaces externas ao sistema. A Figura 3.10 representa dois exemplos diferentes de aplicação do diagrama N2.

Figura 3.10– Exemplos de aplicações do diagrama N2.



TDRS = Tracking and Data Relay Satellite S/C = Spacecraft

O primeiro diagrama representa um satélite, com os subsistemas na diagonal e os tipos de interfaces entre os subsistemas na parte superior direita do diagrama. O segundo diagrama representa um sistema espacial completo, com os segmentos do sistema representados na diagonal, os dados e comandos utilizados entre os segmentos representados nas células do diagrama, e as entradas e saídas de dados externos ao sistema representados no lado de fora do diagrama.

Fonte: Guerra (2008).

3.6. Níveis de maturidade tecnológica em projetos de sistemas espaciais

Esta seção apresenta algumas das principais aplicações da escala TRL sugeridas para utilização em projetos de desenvolvimento de sistemas espaciais, segundo a NASA (2017) e ECSS (2017a). As escalas IRL e SRL ainda não possuem aplicações sugeridas nestas referências, por serem mais recentes.

A Tabela 3.3 descreve a utilização da escala TRL pela NASA (2017) como apoio à tomada de decisões, sendo utilizada em revisões de projeto que ocorrem na transição entre fases de desenvolvimento de uma missão espacial.

Tabela 3.3 - Aplicação da escala TRL em revisões de projetos da NASA.

Revisão de projeto	Utilização da escala TRL
Transição da Fase Pré-A para A	Avaliação das potenciais necessidades de tecnologia em relação aos níveis de maturidade tecnológica atuais e esperados, bem como potenciais oportunidades para utilizar fontes comerciais, acadêmicas e outras fontes de tecnologia. O Plano de Desenvolvimento Tecnológico é desenvolvido para identificar tecnologias a serem desenvolvidas, sistemas herdados a serem modificados, rotas tecnológicas alternativas a serem percorridas, e estabelecer critérios e métricas para tomada de decisões em pontos chave do projeto. Criação da lista inicial de avaliação de maturidade tecnológica do projeto.
Transição da Fase A para B	Atualização da lista de avaliação de maturidade tecnológica do projeto e do plano de desenvolvimento tecnológico.
Transição da Fase B para C	Avaliação de maturidade tecnológica demonstrando que todos os sistemas, subsistemas e componentes alcançaram um nível de maturidade tecnológica adequado para a missão espacial em questão, com evidências demonstradas de qualificação no ambiente relevante desejado.

Fonte: Adaptado de NASA (2017).

Assim, a escala TRL é utilizada pela NASA (2017) como apoio a avaliações técnicas nas primeiras fases de desenvolvimento de missões espaciais, sendo que é utilizada como critério decisivo na transição para a Fase C, onde as tecnologias devem estar de acordo com um critério mínimo de maturidade tecnológica para poderem avançar no desenvolvimento da missão. Este critério mínimo de maturidade tecnológica para avançar no desenvolvimento da missão está associado ao nível de risco aceitável para dar continuidade à missão espacial em questão.

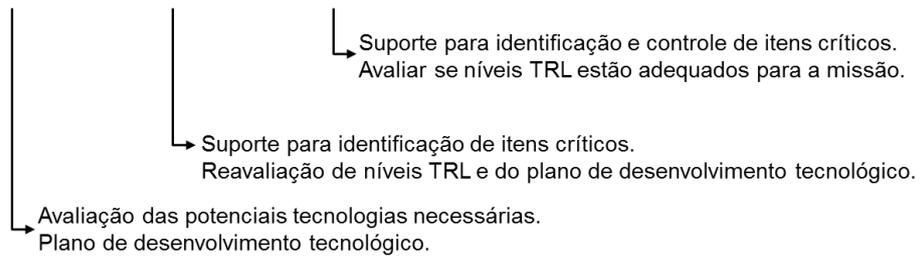
O critério de transição para a Fase C utilizado pela NASA (2017) é que as tecnologias empregadas no projeto tenham maturidade tecnológica no mínimo igual ao nível TRL 6 em missões operacionais, implicando que já tenha sido realizado seu desenvolvimento tecnológico (FRERKING; BEAUCHAMP, 2016; ECSS, 2017a). Em outros casos, como em missões voltadas para demonstrações tecnológicas, é aceitável que as tecnologias empregadas tenham maturidade tecnológica no mínimo igual ao nível TRL 5 (FRERKING; BEAUCHAMP, 2016). Vale lembrar que o nível TRL 6 da escala da NASA é equivalente ao nível TRL 7 da escala utilizada pela ECSS (2017a).

A ESA também propõe a utilização da escala TRL na transição entre fases de desenvolvimento de uma missão espacial (ECSS, 2017a), de maneira muito similar à NASA. Neste caso, é proposto também a aplicação da escala TRL para apoiar a identificar e controlar a lista de itens críticos, que são tecnologias ou produtos identificados como críticos para garantir o correto funcionamento e a alta confiabilidade esperada para o sistema espacial em desenvolvimento (ECSS, 2008). Na transição para a Fase C do projeto, a expectativa é de que as tecnologias críticas do projeto tenham maturidade tecnológica no mínimo igual ao nível TRL 6 (ECSS, 2017a).

Assim, a Figura 3.11 ilustra a aplicação da escala TRL como apoio à tomada de decisões em revisões de projeto de desenvolvimento de sistemas espaciais, de acordo com a NASA (2017) e ECSS (2017a).

Figura 3.11 – Uso da escala TRL em revisões de projetos na área espacial.

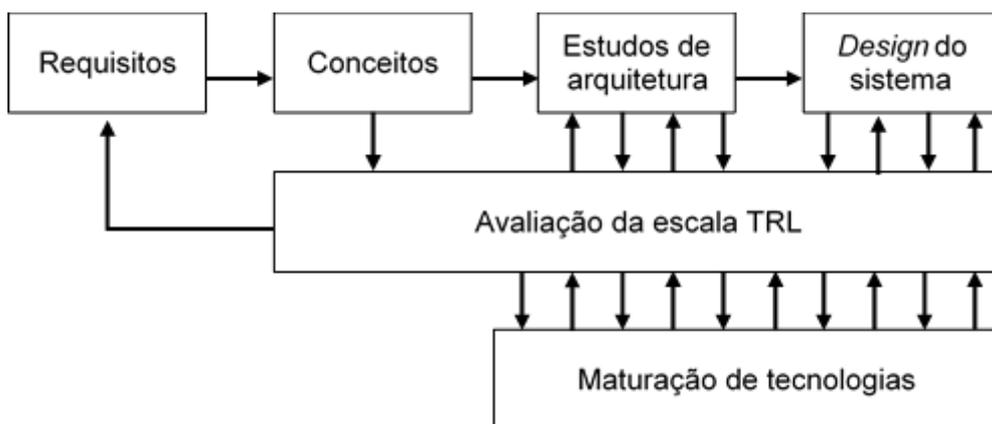
NASA	Pré-A. Análise de conceitos	A. Desenvolvimento de conceitos e tecnologias	B. <i>Design</i> preliminar e conclusão de tecnologias	C. <i>Design</i> final e fabricação	D. Montagem, Integração e testes do sistema, Lançamento e checagem	E. Operação e apoio	F. Fechamento
ECSS	0. Análise de missão	A. Análise de viabilidade	B. Definição preliminar	C. Definição detalhada	D. Qualificação e produção	E. Utilização	F. Descarte



Fonte: Produção do autor. Adaptado de NASA (2017) e ECSS (2017a).

Segundo a NASA (2017), a escala TRL também é utilizada como apoio a decisões técnicas nas primeiras fases do desenvolvimento de missões espaciais. Estas atividades de apoio são ilustradas na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Atividades de apoio a decisões técnicas utilizando a escala TRL.



Fonte: Adaptado de NASA (2017).

Os parágrafos a seguir explicam a Figura 3.12, de acordo com NASA (2017).

A NASA (2017) recomenda a aplicação da escala TRL com base na hierarquia de produto do sistema (*Product Breakdown Structure – PBS*), a fim de mapear todas as tecnologias envolvidas no sistema, e facilitar análises posteriores relacionadas ao sistema. Durante a análise conceitual da missão, o sistema ainda não está definido em nível de detalhe suficiente, mas mesmo assim é possível utilizar a escala TRL sobre a PBS preliminar da missão a fim de realizar análises preliminares.

Uma vez que o conceito de missão (NASA, 2017) foi formulado e a identificação inicial de tecnologias críticas foi realizada, é necessário desenvolver estudos detalhados de arquitetura, com bastante interação com o processo de avaliação de maturidade tecnológica, como ilustra a Figura 3.12.

O objetivo dos estudos de arquitetura (NASA, 2017) é refinar o *design* do sistema para atender aos requisitos gerais da missão. É imperativo que haja uma relação contínua entre os estudos de arquitetura e os esforços de maturação de tecnologias. Os estudos de arquitetura (NASA, 2017) devem incorporar os resultados da maturação tecnológica, o planejamento de caminhos alternativos e a identificação de novas áreas necessárias ao desenvolvimento, uma vez que a arquitetura é refinada.

Do mesmo modo, no processo de maturação tecnológica (NASA, 2017) são identificados requisitos que podem não ser viáveis e rotas de desenvolvimento que podem não ter sucesso, sendo que estas informações devem ser transmitidas ao processo de estudos de arquitetura em tempo hábil.

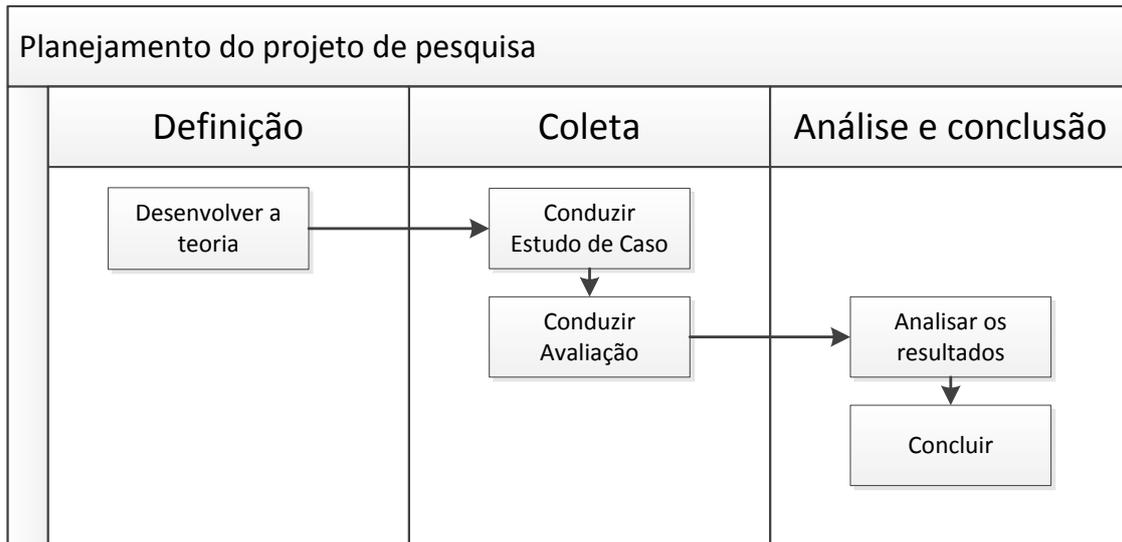
O processo de estudos de arquitetura (NASA, 2017) também deve fornecer informações para o processo de desenvolvimento de tecnologias em relação às mudanças nos requisitos. Deve ser dada especial atenção aos sistemas herdados, na medida em que são frequentemente utilizados em arquiteturas e ambientes diferentes daqueles em que foram projetados para operar.

4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi selecionada a metodologia *Design Science* (SIMON, 1996). De acordo com Dresch et al. (2015) e Hevner et al. (2004), a metodologia de pesquisa *Design Science* orienta a formulação e apresentação de soluções para melhorar sistemas existentes, resolver problemas ou criar novos artefatos (construto, um modelo, um método ou uma instanciação) que contribuam para uma melhor atuação humana na sociedade ou em organizações. As pesquisas realizadas com esta metodologia não só propõem soluções para problemas práticos, mas também contribuem para aprimorar teorias. Desta maneira, a pesquisa deve atender ao rigor e validade científica e também atender à validade pragmática, buscando assegurar que a solução proposta de fato funcione para resolver o problema de pesquisa formulado. A metodologia reconhece que os problemas existentes nas organizações costumam ser específicos, porém as soluções propostas através do *Design Science* são formulados de forma a serem generalizáveis para uma determinada classe de problemas.

As etapas para o desenvolvimento da pesquisa são apresentadas na Figura 4.1 e foram definidas a fim de agrupar as atividades propostas para condução de pesquisas utilizando o método *Design Science* (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 5).

Figura 4.1 – Planejamento do projeto de pesquisa.



Fonte: Produção do autor. Baseado em Yin (2001) e Dresch et al. (2015).

A etapa de desenvolvimento da teoria incluiu as seguintes atividades propostas para o método *Design Science* (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 5): conscientização do problema, identificação de artefatos e configuração de classes de problemas, proposição de artefatos para resolução do problema, projeto do artefato e desenvolvimento do artefato. Foram utilizadas como base as informações contidas nesta dissertação nas seções de introdução e revisão bibliográfica, que correspondem às seguintes atividades propostas para o método *Design Science* (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 5): identificação do problema e revisão da literatura.

A condução do estudo de caso foi planejada de forma que pudesse ser utilizada como meio de avaliação observacional (HEVNER et al., 2004; DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 3) para a etapa seguinte da pesquisa, que foi a condução de avaliação do método proposto. Assim, foi estabelecida uma sequência de fatos e tipos de análises para o estudo de caso de maneira a propiciar que os avaliadores pudessem formar senso crítico em relação às perguntas contidas na entrevista de avaliação, conforme proposto na metodologia *Design Science* (TREMBLAY; HEVNER; BERNDT, 2010). Esta sequência é apresentada na seção de resultados.

O estudo de caso abordou o desenvolvimento de satélites da série *China-Brazil Earth Resources Satellite* (CBERS), desenvolvidos em parceria entre o Brasil e a China, explorando períodos específicos dos projetos de desenvolvimento a fim de demonstrar as principais aplicações da escala IRL e limitar o escopo do estudo. Os dados técnicos foram coletados por meio da documentação dos sistemas espaciais e por meio de entrevistas a especialistas que participaram do desenvolvimento dos sistemas. Foram analisados documentos relativos à estrutura hierárquica de produtos (PBS), suas interfaces, plano de desenvolvimento, planejamento e controle da verificação, relatórios preparados para revisões de projeto, entre outros documentos. As avaliações de níveis de maturidade foram realizadas pelo autor e refinadas após opiniões dos especialistas. Devido ao sigilo dos dados dos sistemas espaciais contidos neste estudo de caso, o documento original com os dados completos do estudo de caso possui distribuição restrita. Esta dissertação não possui restrição de distribuição e apresenta dados do estudo de caso de maneira a guardar o sigilo necessário, como a substituição dos nomes de subsistemas e de visões de arquiteturas por referências que ilustram, mas não revelam seus dados originais.

A etapa de condução da avaliação corresponde à atividade proposta para o método *Design Science* (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 5) de avaliação do artefato, a fim de expor evidências de que o artefato poderá ser utilizado para atender problemas reais (HEVNER et al., 2004; DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 3).

Para escolher os avaliadores que seriam entrevistados, além do critério da disponibilidade dos mesmos, foi utilizada técnica de grupos focais que é uma das técnicas indicadas para a metodologia *Design Science* (TREMBLAY; HEVNER; BERNDT, 2010; DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 3). O grupo focal exploratório realiza a avaliação do artefato proposto e também pode contribuir com informações para refinar o próprio artefato, e neste caso o grupo focal exploratório consistiu em profissionais que participaram no desenvolvimento de satélites CBERS na função de arquitetos

de sistema. O grupo focal confirmatório realiza a avaliação do artefato proposto e poderá confirmar a utilidade do artefato em sua área de aplicação, e neste caso o grupo focal confirmatório consistiu em profissionais que participaram no desenvolvimento de satélites CBERS em funções que poderiam ser usuárias dos dados gerados pelo artefato. Com um dos entrevistados, foi possível realizar a apresentação, mas não foi possível concluir a entrevista devido à disponibilidade de tempo do entrevistado até a conclusão desta dissertação. Alguns entrevistados não participaram de grupos focais para avaliação, e o objetivo da entrevista foi apenas para coleta de dados para o estudo de caso. No Apêndice B.1, a Tabela B.1 apresenta os dados dos entrevistados. A avaliação consistiu em uma apresentação, seguida de questionário para avaliação. O tempo médio de experiência dos entrevistados dos grupos focais é de 26 anos de experiência profissional. O autor coletou assinaturas dos entrevistados como autorização para utilização dos dados das entrevistas.

A apresentação foi preparada utilizando um roteiro adequado, conforme proposto por Tremblay, Hevner e Berndt (2010): uma explicação da motivação por trás do *design* do artefato, seguida por uma ampla explicação de diferentes cenários sobre onde e como o artefato poderia ser utilizado, uma descrição dos detalhes do *design* do artefato, informações sobre seu uso e finalização com uma tarefa na qual os participantes do grupo de foco são solicitados a utilizar e avaliar o artefato. Assim, o roteiro preparado apresentou o seguinte conteúdo: conceitos sobre a escala TRL, aplicação da escala TRL no estudo de caso, conceitos sobre a escala IRL, ilustração de aplicação tradicional da escala IRL, conceitos e motivações para a aplicação da escala IRL a partir de visões de arquitetura (artefato proposto), aplicações do artefato proposto no estudo de caso, aplicação tradicional da escala IRL no estudo de caso, aplicação da escala SRL no estudo de caso, e ilustração de outras aplicações numéricas com métricas de maturidade. Foi solicitado ao grupo focal exploratório que aplicasse o artefato proposto, por meio da revisão dos dados preparados para o estudo de caso. Desta maneira, os seguintes métodos de avaliação (HEVNER et al., 2004; DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 3) foram utilizados: avaliação observacional ao apresentar a aplicação do

estudo de caso, avaliação experimental ao solicitar que o grupo focal exploratório utilizasse o artefato proposto, e avaliação descritiva ao apresentar ilustração de outras aplicações numéricas com métricas de maturidade. O Apêndice B.2 contém a apresentação utilizada para avaliação, porém com os dados do estudo de caso modificados a fim de preservar sua confidencialidade, com a substituição dos nomes dos satélites, subsistemas e de visões de arquiteturas por referências que ilustram os dados originais.

O questionário de avaliação é composto por duas partes, a primeira busca avaliar a escala IRL e a segunda busca avaliar a aplicação da escala IRL a partir de visões de arquitetura. As perguntas foram preparadas considerando a metodologia proposta por Tremblay, Hevner e Berndt (2010), separadas por três tópicos de avaliação: utilidade, eficácia e outras questões a serem exploradas. As perguntas cobriram aspectos como a utilidade da escala IRL e do artefato proposto, a eficácia da escala IRL e do artefato proposto em relação aos propósitos aos quais visam atender, e outras questões incluindo como a utilização da escala IRL poderia se relacionar com as atividades desenvolvidas no desenvolvimento dos satélites da série CBERS. O questionário foi desenvolvido utilizando o software “Google Formulários” e é apresentado no Apêndice B.3.

Os dados coletados por meio dos questionários durante as entrevistas são apresentados no Apêndice B.4. Os entrevistados de identificação (ID) de números 7 e 8 preferiram responder a um único questionário, por representarem a mesma função no projeto de desenvolvimento dos satélites, e responderam a uma pergunta somente. Com autorização dos entrevistados, o autor gravou as conversas das entrevistas nos trechos em que foram realizadas as perguntas e respostas, porém, as gravações não trouxeram informações relevantes adicionais aos dados já coletados nos questionários.

A etapa de análise dos resultados inclui as atividades propostas para o método *Design Science* (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 5) relativas à explicitação das aprendizagens e generalização para uma classe de problemas.

5 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da pesquisa, compreendendo o desenvolvimento da teoria, ou método proposto, apresentação do estudo de caso realizado, apresentação dos resultados das avaliações realizadas por entrevistas, e discussão dos resultados.

5.1. Desenvolvimento da teoria

Para o desenvolvimento do artefato proposto, foi utilizado como ponto de partida a questão de pesquisa formulada, que é apresentada na seção Introdução desta dissertação. A seguir é apresentado a conscientização do problema, que é uma contextualização mais aprofundada sobre a questão de pesquisa.

De acordo com a literatura, a escala IRL é uma medição sistemática das interações de interfaces compatíveis para várias tecnologias e da comparação consistente da maturidade entre distintos pontos de integração (SAUSER et al., 2006), ou de maneira mais resumida, a escala IRL é uma métrica que busca mensurar a maturidade da integração entre dois ou mais elementos de um sistema (ISRACOI, 2017). A utilização da escala IRL suporta os engenheiros de sistemas a identificar áreas que podem exigir maiores esforços de desenvolvimento, além de representar uma medida dos riscos envolvidos no amadurecimento e na integração de elementos em um sistema, e pode ser aplicada para auxiliar tanto o desenvolvimento de novos sistemas quanto à inserção de novas tecnologias em um sistema (ISRACOI, 2017).

A escala IRL, desde sua concepção original (SAUSER et al., 2006) e suas atualizações (SAUSER et al., 2010; AUSTIN; YORK, 2015), vem sido aplicada estabelecendo apenas um único valor da escala IRL à integração entre dois ou mais elementos do sistema. No entanto, em sistemas complexos podem existir diferentes tipos de interações entre os mesmos elementos do sistema, com interfaces de distintas naturezas (EISNER, 2005). Estas diferentes interações podem ser desenvolvidas por meio de distintos pacotes de trabalho no projeto

(EISNER, 2008), e podem ser verificadas por distintos modelos do sistema (BLANCHARD; FABRYCKY, 2006). Assim, pode ser útil estabelecer distintos valores da escala IRL para cada uma das diferentes interações que existem entre os elementos do sistema que estão sendo analisados, pelo fato de que em um mesmo momento do projeto é possível que estas diferentes interações existentes sejam avaliadas com distintos níveis de maturidade de integração. Apenas recentemente e tornado público após o desenvolvimento desta pesquisa, a pesquisa de Ross (2018) apresenta a aplicação da escala IRL estabelecendo diferentes valores da escala IRL para cada uma das diferentes interações que existem entre os elementos do sistema que estão sendo analisados.

No desenvolvimento de sistemas espaciais todos estes conceitos são pertinentes. Visando exemplificar o problema descrito no parágrafo acima, considere um satélite com um subsistema dedicado ao controle térmico e um subsistema dedicado à computação de bordo. As interações entre estes dois subsistemas são de dois tipos, com duas interfaces de distintas naturezas (térmica e de dados). Estas interações podem ser desenvolvidas por diferentes pacotes de trabalho no projeto, e podem ser verificadas por diferentes modelos do satélite, por exemplo, um modelo térmico (ECSS, 2010) para verificar a integração de natureza térmica e um modelo de engenharia (ECSS, 2010) para verificar a integração de natureza de dados. Assim, em um mesmo momento do projeto é possível que estas duas interações sejam avaliadas com diferentes níveis de maturidade de integração.

O método de aplicação da escala IRL atualmente proposta na literatura do método *System Readiness Assessment (SRA)* (ISRACOI, 2017) considera três passos para sua implementação: O primeiro passo é a coleta de informações sobre o sistema a fim de compreendê-lo e delimitá-lo. O segundo passo é mapear o sistema a partir de suas camadas de arquitetura, identificando as alocações realizadas a partir dos requisitos do sistema para suas funcionalidades e depois para os elementos do sistema e suas tecnologias. O terceiro passo é realizar avaliações iterativas, utilizando uma matriz quadrada

para representar as interações entre os elementos do sistema e associar a avaliação da escala IRL para cada uma destas interações. Esta matriz quadrada tem o formato de uma matriz DSM básica.

O pesquisador Yasseri (YASSERI, 2013, 2016) começou a explorar propriedades de matrizes DSM descritas na literatura (OLECHOWSKI; EPPINGER; JOGLEKAR, 2015), como modularização e sentido do fluxo das interações, para representar as interações entre os elementos do sistema a fim de realizar a aplicação da escala IRL.

Ambas abordagens descritas anteriormente sugerem que diagramas de interfaces sejam utilizados como suporte à matriz DSM para o mapeamento do sistema e melhor compreensão dos tipos de interações entre seus elementos. Porém estas informações sobre os tipos de interações entre os elementos do sistema atualmente não são incorporadas visualmente na matriz DSM. A matriz DSM proposta por ambas abordagens tampouco separa os possíveis diferentes tipos de interações entre os mesmos elementos do sistema a fim de estabelecer diferentes níveis da escala IRL, conforme apontado anteriormente. A recente pesquisa de Ross (2018) propõe a separação dos tipos de interações entre os mesmos elementos do sistema e identificação dos tipos de interações através do uso de legendas dentro de cada célula de uma matriz DSM.

Uma maneira de auxiliar a analisar e organizar as diferentes interações entre elementos de um sistema complexo é a utilização de visões de arquitetura (MAIER; RECHTIN, 2000). As visões de arquitetura de um sistema podem expressar interações entre os elementos do sistema, podem ser organizadas por funcionalidades, tipos de interações, disciplinas ou outros pontos de vistas de interesse (IEEE; IEC; ISO, 2011). Estas visões de arquitetura podem guiar a análise, o desenvolvimento e a verificação do sistema, por exemplo através de testes em modelos do sistema que representam estas visões de arquitetura (MAIER; RECHTIN, 2000). As visões de arquitetura podem influenciar até na organização de projetos de desenvolvimento de sistemas complexos, com a alocação de arquitetos de sistema dedicados a determinadas visões de arquitetura, sendo que a função de um arquiteto de sistema emergiu a partir da

função de um engenheiro de sistema e da utilização de conceitos de arquitetura de sistemas (MAIER; RECHTIN, 2000).

Assim, foi estabelecida a hipótese de que poderia ser útil aplicar a escala IRL a partir de diferentes visões de arquitetura de sistemas. As visões de arquitetura a serem utilizadas expressariam interações entre os elementos do sistema, e poderiam expressar por exemplo funcionalidades ou diferentes naturezas de interfaces. O novo método proposto poderia ser aplicado para análise de sistemas que já possuam estas visões de arquitetura, ou mesmo para sistemas que não possuam e que seja de interesse de análise estabelecer estas visões de arquitetura. A utilização de visões de arquitetura em matrizes para avaliação da escala IRL poderia auxiliar a organizar a análise do sistema por meio de suas visões de arquitetura selecionadas, e poderia auxiliar a resolver os dois problemas apontados anteriormente na aplicação da escala IRL, onde as matrizes propostas nas abordagens tradicionalmente utilizadas não incorporam informações sobre os tipos de interações entre os elementos do sistema e tampouco separam os diferentes tipos de interações entre mesmos elementos do sistema a fim de estabelecer possíveis diferentes níveis da escala IRL.

Desta maneira, a funcionalidade esperada para o artefato proposto é de avaliar a maturidade de integração de elementos tecnológicos a partir das diferentes visões de arquitetura de um sistema. A condição de utilização do artefato é que existam ou sejam estabelecidas visões de arquitetura que expressem interações entre os elementos do sistema.

Partindo dos conceitos de que a representação de sistemas através de matrizes permite dois tipos de análises: gráfica e numérica (EPPINGER; BROWNING, 2012), e de que a arquitetura de um sistema pode ser representada pelas interações entre seus elementos e pelo conjunto de decisões tomadas (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016) que guiam seu *design* e evolução (EPPINGER; BROWNING, 2012), foram definidas características esperadas e desejáveis para o desempenho, ou eficácia, do artefato:

- Esperado: facilidade de utilização;
 - Facilidade para realizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura;
 - Facilidade para visualizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura;
- Esperado: capacidade de análise gráfica;
 - Capacidade de ressaltar a interação entre os elementos do sistema;
 - Capacidade de ressaltar as diferentes visões de arquitetura do sistema, como uma forma de mostrar conjuntos de decisões tomadas para o sistema que guiam seu *design* e evolução;
- Desejável: capacidade de análise numérica;
 - Capacidade de utilizar índices numéricos compostos já existentes, como o SRL;
 - Capacidade de utilizar futuros índices numéricos compostos, a serem desenvolvidos, utilizando visões de arquitetura.

Na revisão de literatura, foi possível identificar artefatos existentes na literatura desenvolvidos para resolver problemas similares aos da questão de pesquisa, a fim de oferecer subsídios e talvez auxiliar na assertividade da proposta do novo artefato. A Tabela 5.1 apresenta os artefatos identificados na literatura no momento do início da pesquisa. Na época em que esta atividade foi conduzida, a pesquisa de Ross (2018) ainda não havia se tornado pública, portanto não se encontra identificado nesta tabela.

Tabela 5.1 – Artefatos existentes na literatura no início da pesquisa.

Tipos de problemas	Artefatos identificados na literatura
Representar diferentes tipos de interação entre os elementos em uma matriz DSM.	Dividir cada célula da matriz em outras quatro células para representar os quatro tipos de interações propostas (PIMMLER; EPPINGER, 1994).
	Utilização de cores ou outros elementos gráficos distintivos na matriz DSM (EPPINGER; BROWNING, 2012, p. 22–23).
	Representação de interações assimétricas entre elementos resultando em uma matriz assimétrica (EPPINGER; BROWNING, 2012, p. 23).
Mapear informações de diferentes domínios aos elementos do sistema.	Matriz DMM (DANILOVIC; BROWNING, 2007).
Comunicar a progressão e refinamento gradual de características ou <i>design</i> até os elementos físicos do sistema.	Utilizar matrizes DMM e MDM como a ferramenta QFD (MAIER; RECHTIN, 2000, p. 185; BROWNING, 2016).

Fonte: Produção do autor.

A partir destas considerações, foram propostos dois possíveis artefatos para tentar resolver o problema em questão, que é avaliar a maturidade de integração de elementos tecnológicos a partir das diferentes visões de arquitetura de um sistema. A Tabela 5.2 apresenta informações preliminares e análise comparativa entre os possíveis artefatos. As descrições dos dois artefatos propostos na Tabela 5.2 se referem aos tipos de matrizes que poderiam ser utilizadas para aplicação da escala IRL utilizando informações de visões de arquitetura de um sistema.

Tabela 5.2 – Artefatos propostos para tentar resolver o problema em questão.

Artefato	Justificativa	Vantagens	Desvantagens
Matriz DSM, com células utilizando elementos gráficos e múltiplas interações entre os elementos do sistema para indicar as visões de arquitetura.	Solução mais próxima da prática atual da escala IRL por meio de uma matriz DSM.	Maior detalhamento de interações entre elementos do sistema, permite uma transição para realizar as análises numéricas já existentes (SRL) em uma matriz DSM.	Matriz mais complexa para visualizar.
Matriz DMM, mapeando os elementos do sistema e as visões de arquitetura.	Maior enfoque às visões de arquitetura do sistema.	Dados organizados por visões de arquitetura.	Menor detalhamento de interações entre elementos do sistema, não permite realizar as análises numéricas já existentes (SRL) em uma matriz DSM.

Fonte: Produção do autor.

Foi desenvolvido um método compreendendo os dois artefatos propostos, já que poderiam proporcionar análises complementares entre si, e poderiam proporcionar aos potenciais usuários dos artefatos a escolha entre um dos artefatos ou ambos para utilizar em suas futuras aplicações. O método com os dois artefatos propostos é descrita a seguir.

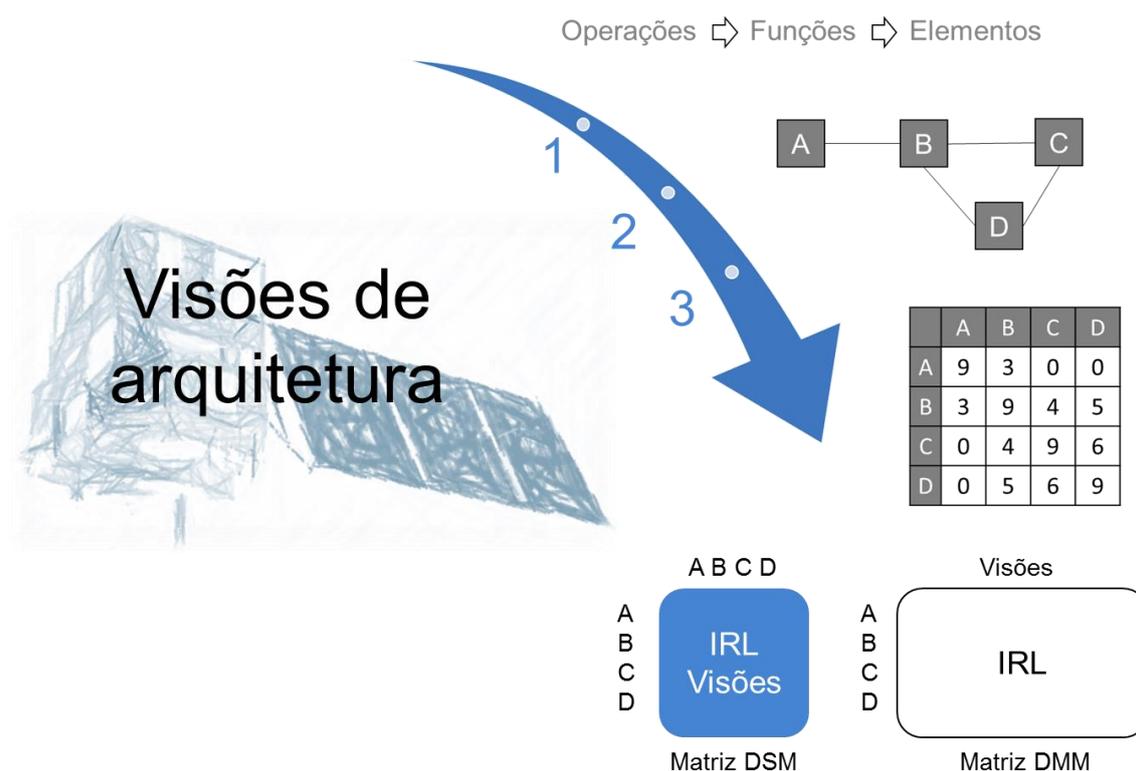
5.1.1. Método proposto

Esta seção apresenta o método proposto para avaliar a maturidade de integração de elementos tecnológicos a partir de diferentes visões de

arquitetura de sistemas. O método proposto é complementar ao método atual de aplicação da escala IRL (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017).

A Figura 5.1 ilustra o método proposto, sugerindo incorporar as informações de visões de arquitetura ao método atual de aplicação da escala IRL, e sugerindo a aplicação de dois tipos de matrizes, conforme será descrito a seguir.

Figura 5.1 – Ilustração do método proposto.



Fonte: Produção do autor.

Ao realizar a coleta de informações sobre o sistema a fim de compreendê-lo (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017), é proposto selecionar visões de arquitetura de interesse para análise. Para isso, é recomendado checar se já existem visões de arquitetura criadas para analisar o sistema, e é possível criar novas visões de arquitetura de interesse de análise. Para ser compatível com a aplicação da escala IRL, as visões de arquitetura devem representar interações

entre os elementos do sistema, sendo possível identificar o tipo de interface por meio da qual a integração é implementada.

A seguir são apresentadas algumas sugestões e recomendações ao selecionar as visões de arquitetura que serão utilizadas. É sugerido que as visões de arquitetura possam ser estabelecidas tanto a partir de funcionalidades do sistema como a partir de características físicas do sistema (IEEE; IEC; ISO, 2011, A.2), como os seus tipos de interações (EPPINGER; BROWNING, 2012, p. 22–23). Recomenda-se escolher um conjunto de visões de arquitetura que são críticas para o sucesso do sistema e que permitam representar a integralidade do sistema (MAIER; RECHTIN, 2000). Recomenda-se documentar os pontos de vistas e preocupações que regem as visões de arquitetura (IEEE; IEC; ISO, 2011), para compreender e esclarecer o que a visão de arquitetura expressa. Para auxiliar a identificar os tipos de interfaces associadas a cada visão de arquitetura, recomenda-se utilizar práticas relativas ao sistema sob análise, como por exemplo a norma para o setor espacial ECSS-E-ST-10-24C (2015) que define naturezas de interfaces como: elétrica, óptica, controle térmico, estrutural, representação de dados, software, comunicações, controle, operações, entre outras naturezas. As naturezas de interfaces também podem ser inicialmente agrupadas em categorias como elétrica/funcional, mecânica/física, *software*, e serviços (funcionalidades derivadas de requisitos como geração de energia, comunicação, de fluidos e ambientais), e depois serem melhor detalhadas, segundo a NASA (LALLI; KASTNER; HARTT, 1997). Ou ainda, inicialmente as interfaces podem ser agrupadas como físicas, de informação, de controle, ou *soft*, e depois serem melhor detalhadas, segundo Ross (2018).

Ao mapear o sistema (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017) para representar sua arquitetura, é proposto utilizar técnicas que permitam mapear as interações entre os elementos do sistema a partir das visões de arquitetura selecionadas. Por exemplo, uma das técnicas possíveis é utilizar o diagrama *N-Squared* (N2) para mapear as interfaces entre os elementos do sistema e identificar as visões de arquitetura associadas a estas interfaces.

A fim de realizar as avaliações iterativas utilizando a escala IRL (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017) a partir de visões de arquitetura, são propostos dois tipos de matrizes para representar o sistema: matriz DSM e matriz DMM, que serão descritas a seguir. Para a utilização, pode ser escolhida uma das matrizes ou ambas, dependendo de qual opção for mais proveitosa para análise. Para representar a avaliação de níveis de maturidade de integração entre os elementos do sistema a partir de visões de arquitetura utilizando os tipos de matrizes propostas, são aplicadas as regras da escala IRL (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017) para avaliar as interações entre os elementos do sistema.

O primeiro tipo de matriz proposta é a matriz DSM utilizando elementos gráficos distintivos (EPPINGER; BROWNING, 2012, p. 22–23) e múltiplas interações entre os elementos do sistema (PIMMLER; EPPINGER, 1994) para indicar as visões de arquitetura. Os elementos distintivos podem ser por exemplo cores diferentes para as diferentes visões de arquitetura, e as múltiplas interações são representadas dividindo as células em partes para indicar as diferentes visões de arquitetura. A literatura de aplicação de matriz DSM (EPPINGER; BROWNING, 2012) traz exemplos de como estas abordagens de elementos distintivos e múltiplas interações entre os elementos podem ser implementadas. A proposta de Ross (2018) utiliza legendas dentro das células como elementos distintivos para identificar as múltiplas interações entre os elementos do sistema. Caso necessário, também é possível representar o sistema através de uma matriz DSM para cada visão de arquitetura de interesse.

Propõe-se que é possível transformar a matriz DSM proposta, com múltiplas interações entre os elementos do sistema, em uma matriz DSM no formato em que é tradicionalmente utilizada com apenas uma interação entre os elementos do sistema (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017). Para isto, nas células da matriz DSM proposta que representarem múltiplas interações, é sugerido que seja considerado o menor valor da escala IRL dentre as interações existentes para representar o nível IRL da interação entre os

elementos do sistema. A prática sugerida de escolher o menor valor dentre os níveis de maturidade foi baseada na prática da escala TRL (NASA, 2017), onde ao avaliar um elemento do sistema deve ser tomado o menor valor de TRL dentre os elementos de nível hierárquico inferior que o compõem.

O segundo tipo de matriz proposta a fim de representar as visões de arquitetura ao avaliar a escala TRL é utilizar uma matriz do tipo *Domain Mapping Matrix* (DMM), que é um tipo de matriz utilizada para mostrar a relação entre diferentes domínios do sistema. Nesta aplicação proposta, os elementos do sistema são representados nas linhas da matriz enquanto que as visões de arquitetura são representadas nas colunas, ou vice-versa, e o nível IRL é representado nas células da matriz. Para realizar esta avaliação é possível avaliar o nível de maturidade de integração para determinado elemento do sistema, considerando suas interações com os demais elementos do sistema a partir das particularidades da visão de arquitetura em questão. O diagrama de mapeamento do sistema, comentado anteriormente, pode servir de apoio para visualizar as interações entre cada um dos elementos do sistema a partir da visão de arquitetura em análise. Como a matriz DMM, por si só, não exibe todas as interações entre os elementos do sistema, recomenda-se que a matriz DMM seja principalmente utilizada em visões de arquitetura que representam funcionalidades do sistema, que normalmente são alocadas a um ou poucos elementos do sistema que interagem com os demais elementos do sistema para executar a funcionalidade sendo analisada, pois se a funcionalidade for distribuída ou alocada a muitos elementos do sistema, a matriz DMM pode não ser capaz de mostrar estas diferentes interações entre os elementos do sistema.

Tradicionalmente a avaliação da escala IRL é realizada apresentando as interações entre os elementos do sistema em uma matriz DSM. A utilização da matriz DMM é proposta para poder auxiliar a análise de sistemas que possuem muitas visões de arquitetura, e onde seja interessante ressaltar a organização e integração do sistema a partir de suas visões de arquitetura. Ao ressaltar a visualização a partir das visões de arquitetura, a utilização da matriz DMM

proposta poderá auxiliar a melhor compreender as relações de progressão de refinamento do *design* de conceitos mais abstratos das visões de arquitetura até os elementos do sistema, apontadas como o princípio organizador da arquitetura de sistemas (MAIER; RECHTIN, 2000). Ainda, a utilização da matriz DMM poderá auxiliar a visualizar a maturidade de integração de acordo com o conceito de integração de Langford (2013) que propõe expressar a integração de sistemas como “parte-ao-todo-esperado” ao invés de somente “parte-a-parte”, já que em seu conceito de integração a construção de um todo a partir de partes é mais do que simplesmente combinar ou montar estas partes, sendo que as visões de arquitetura representam visões do “todo esperado” citado por este autor.

5.2. Estudo de caso

Conforme comentado na seção de metodologia, os dados do estudo de caso são apresentados de maneira a guardar o sigilo necessário dos dados originais, com a substituição dos nomes dos satélites, subsistemas e de visões de arquiteturas por referências que ilustram os dados originais.

O estudo de caso tem como principal foco o satélite SAT1, mas também aborda de maneira resumida outros dois segmentos do sistema espacial e um outro satélite, o SAT2, a fim de poder comparar os resultados de avaliações de níveis de maturidade. A avaliação de níveis de maturidade tem como foco principal a escala IRL e é realizada de maneira alternada entre diferentes tipos de aplicações a fim de poder comparar diferentes possíveis análises. Foi aplicado o método proposto nesta dissertação. Também foram realizadas as avaliações de níveis de maturidade utilizando as escalas TRL e SRL. Assim, foi estabelecida uma sequência de fatos e tipos de análises para o estudo de caso de maneira a propiciar que os avaliadores pudessem formar senso crítico em relação às perguntas contidas na entrevista de avaliação, conforme proposto na metodologia da pesquisa.

5.2.1. Informações sobre o sistema

O sistema espacial em análise é composto pelos seguintes segmentos: segmento espacial (satélite), segmento lançador, segmentos de controle e segmentos de aplicação.

O satélite SAT1 foi desenvolvido para missão espacial para aplicações em sensoriamento remoto. O satélite foi desenvolvido a partir de outro satélite já desenvolvido, substituindo alguns subsistemas e introduzindo melhorias em subsistemas existentes.

O satélite SAT1 possui catorze subsistemas, identificados como SS01 a SS14, sendo sete subsistemas que compõem o módulo de serviço e sete subsistemas que compõem o módulo de carga útil. Foi escolhido o nível hierárquico de subsistema para realizar as avaliações de níveis de maturidade deste estudo de caso.

Foram utilizadas dez visões de arquitetura para representar as interações entre os subsistemas do satélite, e entre os subsistemas com os demais segmentos do sistema espacial, sendo identificadas como VA-A a VA-J. Destas dez visões de arquitetura, oito já eram utilizadas pelos arquitetos de sistema para o desenvolvimento do satélite, portanto já faziam parte da documentação do projeto de desenvolvimento. As outras duas visões de arquitetura foram propostas pelo autor para complementar a análise do sistema, já que as interações entre os subsistemas que elas representam não estavam incluídas nas demais visões de arquitetura, pois eram tratadas somente na documentação dos subsistemas. Os profissionais entrevistados que eram responsáveis por estas interações concordaram com a utilidade da proposta.

Estas dez visões de arquitetura representam nove naturezas de interfaces, de acordo com classificações do padrão ECSS (2015) para gestão de interfaces, são: natureza elétrica, estrutural, de controle térmico, de comunicações, de representação de dados, de software, de operações, óptica, e de controle.

As avaliações de métricas de maturidade do SAT1 foram realizadas em dois momentos distintos: no momento T0 em fase inicial do projeto, e no momento T1 que corresponde ao final de uma das fases do projeto.

De maneira similar, o satélite SAT2 pertence ao mesmo programa espacial do SAT1, possui dezesseis subsistemas e foram utilizadas nove visões de arquitetura para representar suas interações. As avaliações de métricas de maturidade do SAT1 foram realizadas no momento T2, que corresponde ao final de uma das fases do projeto de maneira análoga ao momento T1 do SAT1.

Outros segmentos do sistema espacial foram utilizados para analisar as interações do satélite SAT1, identificados como SG1 a SG4. Os segmentos SG2 e SG3 foram analisados em momentos antes e após testes realizados durante o desenvolvimento do satélite SAT1, a fim de realizar a avaliação da escala IRL. Foram utilizadas cinco visões de arquitetura, identificadas como VA-K a VA-O, para representar interações entre estes segmentos e os subsistemas do satélite SAT1. Estas visões de arquitetura estão associadas a interfaces com naturezas de representação de dados, de operações e de comunicações, de acordo com as classificações do padrão ECSS (2015). Estas visões de arquitetura representam interações que estão mais associadas às atividades das equipes alocadas no desenvolvimento e operação destes segmentos. Estas visões de arquitetura foram propostas pelo autor, com a concordância dos entrevistados responsáveis por estas interações, a fim de enriquecer a análise do sistema e o estudo de caso.

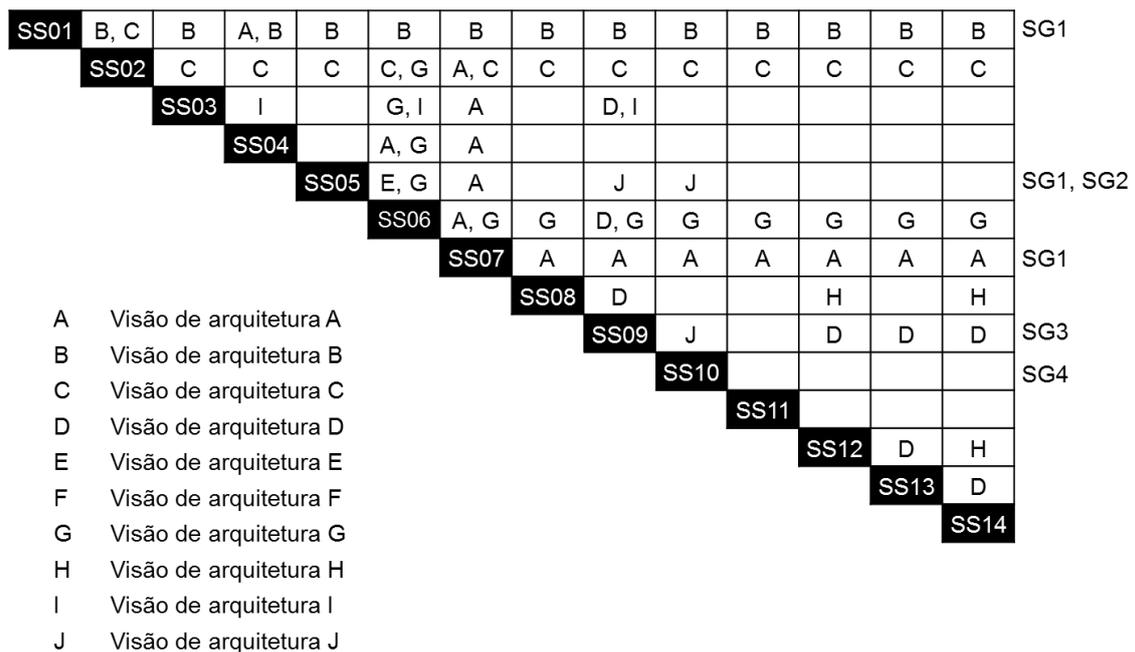
5.2.2. Mapeamento do sistema

Foi utilizado um diagrama do tipo *N-Squared* (N2) para realizar o mapeamento de interfaces e representação do sistema para o estudo de caso do satélite SAT1, resultando no diagrama da Figura 5.2.

No diagrama N2 da Figura 5.2, os subsistemas foram dispostos na diagonal, nas células com preenchimento na cor preta. As interfaces são representadas por letras, nas intersecções entre os subsistemas, acima ou à direita das células de cada subsistema. Por exemplo, entre os subsistemas SS01 e SS05 existe a interface “B”, e entre os subsistemas SS06 e SS09 existem as interfaces “D” e “G”. Os segmentos externos ao satélite que possuem interfaces com os subsistemas do satélite estão representados à direita do diagrama, como por exemplo o subsistema SS05 possui interfaces com os segmentos SG1 e SG2.

As letras que representam as interfaces estão associadas às visões de arquitetura do satélite SAT1 que foram escolhidas para este estudo de caso, como citado na seção 5.2.1 deste documento.

Figura 5.2 - Diagrama N2 do satélite SAT1.



O diagrama apresenta as interfaces entre os subsistemas do satélite, e apresenta as interfaces externas do satélite com outros segmentos do sistema espacial.

Fonte: Produção do autor.

A fim de exemplificar as matrizes propostas para representar o sistema e realizar as avaliações iterativas utilizando a escala IRL a partir de visões de arquitetura, a seguir são apresentadas as matrizes DSM e DMM propostas aplicadas a este estudo de caso e representando as visões de arquitetura do satélite SAT1.

Na matriz DSM proposta, a Figura 5.3 mostra os subsistemas e segmentos externos ao satélite representados repetidamente nas colunas e nas linhas da matriz, e as interações são representadas nas células da matriz, resultando assim em uma matriz simétrica. As letras nas células representam as visões de arquitetura definidas na seção 5.2.1, assim como representadas no diagrama N2 da Figura 5.2.

Figura 5.3 – Matriz DSM representando as visões de arquitetura do satélite SAT1.

	SS01	SS02	SS03	SS04	SS05	SS06	SS07	SS08	SS09	SS10	SS11	SS12	SS13	SS14	SG1	SG2	SG3	SG4
SS01	-	B, C	B	A, B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B			
SS02	B, C	-	C	C	C	C, G	A, C	C	C	C	C	C	C	C				
SS03	B	C	-	I		G, I	A		D, I									
SS04	A, B	C	I	-		A, G	A											
SS05	B	C			-	E, G	A		J	J					E	E		
SS06	B	C, G	G, I	A, G	E, G	-	A, G	G	D, G	G	G	G	G	G		G	G	
SS07	B	A, C	A	A	A	A, G	-	A	A	A	A	A	A	A	A			
SS08	B	C				G	A	-	D			H		H				
SS09	B	C	D, I		J	D, G	A	D	-	J		D	D	D			D	
SS10	B	C			J	G	A		J	-							F	
SS11	B	C				G	A				-							
SS12	B	C				G	A	H	D			-	D	H				
SS13	B	C				G	A		D			D	-	D				
SS14	B	C				G	A	H	D			H	D	-				
SG1	B				E		A								Analisado posteriormente			
SG2					E	G												
SG3						G			D									
SG4										F								

A matriz apresenta as visões de arquitetura associadas às interfaces entre os subsistemas do satélite, e dos subsistemas com os segmentos externos ao satélite.

Fonte: Produção do autor.

Na matriz DMM proposta, a Figura 5.4 mostra os subsistemas e segmentos externos ao satélite representados nas linhas da matriz, enquanto que as visões de arquitetura são representadas nas colunas da matriz, e as células

indicam quais subsistemas ou segmentos possuem interações em cada uma das visões de arquitetura representadas. As letras nas células representam as visões de arquitetura definidas na seção 5.2.1, assim como representadas no diagrama N2 da Figura 5.2.

Figura 5.4 – Matriz DMM representando as visões de arquitetura do satélite SAT1.

	VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I	VA-J
SS01	A	B	C	-	-	-	-	-	-	-
SS02	A	B	C	-	-	-	G	-	-	-
SS03	A	B	C	D	-	-	G	-	I	-
SS04	A	B	C	-	-	-	G	-	I	-
SS05	A	B	C	-	E	-	G	-	-	J
SS06	A	B	C	D	E	-	G	-	I	-
SS07	A	B	C	-	-	-	G	-	-	-
SS08	A	B	C	D	-	-	G	H	-	-
SS09	A	B	C	D	-	-	G	-	I	J
SS10	A	B	C	-	-	F	G	-	-	J
SS11	A	B	C	-	-	-	G	-	-	-
SS12	A	B	C	D	-	-	G	H	-	-
SS13	A	B	C	D	-	-	G	-	-	-
SS14	A	B	C	D	-	-	G	H	-	-
SG1	A	B	-	-	E	-	-	-	-	-
SG2	-	-	-	-	E	-	G	-	-	-
SG3	-	-	-	D	-	-	G	-	-	-
SG4	-	-	-	-	-	F	-	-	-	-

A matriz apresenta o mapeamento de quais subsistemas do satélite e segmentos externos ao satélite possuem interfaces associadas às visões de arquitetura do satélite.

Fonte: Produção do autor.

5.2.3. Aplicação da escala TRL

A fim de realizar a avaliação TRL para os subsistemas do satélite SAT1, foi considerada a escala TRL da norma ABNT NBR ISO 16290:2015 (2015).

Como o satélite SAT1 foi desenvolvido a partir de modificações em um satélite já desenvolvido, foi necessário aprofundar na questão de considerações para a escala TRL em relação aos impactos de mudanças no sistema. Foram consideradas as regras propostas pela NASA (2017), porém adaptadas para a escala TRL da norma ABNT NBR ISO 16290:2015 (2015), devido às diferenças

existentes entre as duas escalas de acordo com ECSS (2017a). Como no estudo de caso havia disponível avaliações de categoria de verificação para os elementos de parte dos subsistemas do SAT1, estas avaliações foram consideradas em conjunto com as regras definidas pela ECSS (2017a) como um ponto de partida para a avaliação da escala TRL, já que ECSS (2017a) faz uma correlação entre a escala TRL e a categoria de verificação dos elementos sendo avaliados. A Tabela 5.3 apresenta estas regras utilizadas.

Tabela 5.3 – Regras consideradas para a escala TRL por mudanças no sistema.

	Regras	Impacto no TRL
NASA	Se a arquitetura, configuração ou o ambiente mudaram.	TRL 6
	Se ambiente e arquitetura são suficientemente próximas da versão anterior.	TRL 7
	Mudanças no <i>design</i> .	(nova avaliação TRL)
ECSS	A – Produto já desenvolvido, sem modificações.	-
	B – Produto já desenvolvido, sem modificações, mas não considerado como qualificado para a missão.	TRL 6
	C – Produto já desenvolvido, com modificações em seu <i>design</i> .	TRL 4 a 6 conforme o caso. TRL < 6 se função crítica foi impactada.
	D – Produto em desenvolvimento ou recém desenvolvido.	Nova avaliação deve ser realizada.

Fonte: Adaptado de NASA (2017) e ECSS (2017a).

A Tabela 5.4 apresenta a avaliação da escala TRL para os subsistemas do satélite SAT1 no momento T0. Foram inicialmente utilizadas as informações de categoria de verificação conforme a segunda coluna da Tabela 5.4, quando disponíveis no estudo de caso, e aplicadas as regras da ECSS (2017a). Em seguida foram aplicadas as regras da NASA (2017). A terceira coluna da Tabela 5.4 apresenta os resultados da avaliação da escala TRL. A última coluna apresenta as justificativas para os resultados da avaliação TRL.

Tabela 5.4 – Avaliação da escala TRL de SAT1 no momento T0.

Sub-sistema	Categoria de verificação	TRL	Justificativa
SS01	B	3	Mudança no <i>design</i> .
SS02	A	3	Mudança no <i>design</i> .
SS03	A	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS04	B	6	Categoria B para elementos do Subsistema.
SS05	B	6	Categoria B para elementos do Subsistema.
SS06	B	6	Categoria B para elementos do Subsistema.
SS07	A	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS08	-	4-6	Em desenvolvimento, ainda não qualificado.
SS09	-	6	Herança de outros satélites.
SS10	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS11	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS12	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS13	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS14	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.

Fonte: Produção do autor.

Em relação ao momento T1, foi considerado que as avaliações de TRL dos subsistemas do satélite SAT1 eram iguais às avaliações de TRL no momento T0, pois até o momento T1 não houve testes realizados que modificaram a avaliação TRL. Os subsistemas com menores avaliações de TRL, como SS01 e SS02, foram verificados por análise e não por testes, portanto permaneceram com TRL 3. Outros subsistemas já possuíam avaliações TRL mais altas e permaneceram nestes patamares.

Entre os momentos T0 e T1 do projeto de desenvolvimento do satélite SAT1, houve testes de interfaces e ao nível hierárquico de sistema, que não foram representados pela avaliação da escala TRL, mas foram representados nas avaliações da escala IRL posteriormente descritas neste documento.

Estas avaliações da escala TRL foram realizadas no estudo de caso a fim de que nas entrevistas de avaliação, os entrevistados pudessem comparar as escalas TRL e IRL e formar senso crítico para algumas das perguntas previstas.

5.2.4. Aplicação da escala IRL

A fim de realizar a avaliação IRL, foi considerada a escala IRL atual (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017), apresentada na Tabela E.1.

Ainda não há na literatura da escala IRL critérios formais sobre o impacto nos níveis de maturidade em relação às mudanças no sistema. Assim, a partir das regras da NASA (2017) para mudanças no sistema em relação à escala TRL, o autor considerou regras equivalentes para a escala IRL. A Tabela 5.5 apresenta estas regras consideradas.

Tabela 5.5 – Regras consideradas para a escala IRL por mudanças no sistema.

Regras consideradas	Impacto no IRL
Mudanças na arquitetura, configuração ou ambiente.	IRL 6
Ambiente e arquitetura são suficientemente próximas da anterior.	IRL 7
Funcionalidades de integração permanecem, ainda não foram testadas em conjunto, mas foram testadas nas partes em separado.	IRL 5
Mudanças nas funcionalidades de integração, ainda não testadas.	IRL 3

Fonte: Produção do autor. Baseado em NASA (2017).

A primeira avaliação foi realizada para satélite SAT1 no momento T0, para possibilitar a avaliação de como a escala IRL pode mensurar os impactos de mudanças no SAT1 a partir de um satélite já desenvolvido. Foi utilizada matriz do tipo DMM para realizar a avaliação, onde os números nas células representam os níveis de maturidade de integração (IRL) para os subsistemas a partir das correspondentes visões de arquitetura, conforme apresenta a Figura 5.5.

As mudanças de *design* nos subsistemas SS01 e SS02 afetaram principalmente os aspectos relacionados às visões de arquitetura A, B e C, portanto foram avaliados como nível 3 da escala IRL para estes subsistemas. Os impactos da introdução dos subsistemas SS08 e SS09 foram avaliados como nível 3 ou nível 5 da escala IRL de acordo com as considerações da Tabela 5.5 em relação a cada uma das visões de arquitetura do SAT1. Mudanças na arquitetura, configuração do satélite ou pequenas melhorias nos subsistemas foram avaliados como níveis IRL 5, 6 ou 7 para cada visão de arquitetura, também de acordo com as considerações da Tabela 5.5. Algumas das melhorias no satélite SAT1 relacionados à visão de arquitetura G ocasionaram a avaliação de nível 3 da escala IRL para as interações com os segmentos SG2 e SG3.

A Figura 5.5 também apresenta setas na cor preta para sinalizar impactos maiores de mudanças em subsistemas e visões de arquitetura, e setas brancas para sinalizar mudanças de menor impacto.

Figura 5.5 – Avaliação da escala IRL do satélite SAT1 no momento T0.

		VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I	VA-J
→	SS01	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-
→	SS02	3	3	3	-	-	-	6	-	-	-
→	SS03	6	6	6	5	-	-	6	-	5	-
→	SS04	6	7	6	-	-	-	6	-	7	-
→	SS05	6	7	6	-	6	-	6	-	-	5
→	SS06	6	7	6	5	7	-	6	-	7	-
→	SS07	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
→	SS08	5	3	3	5	-	-	5	3	-	-
→	SS09	5	3	3	5	-	-	5	-	5	5
	SS10	6	6	6	-	-	6	6	-	-	5
	SS11	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
	SS12	6	6	6	5	-	-	6	5	-	-
	SS13	6	6	6	5	-	-	6	-	-	-
	SS14	6	6	6	5	-	-	6	5	-	-
→	SG1	7	6	-	-	6	-	-	-	-	-
→	SG2	-	-	-	-	6	-	3	-	-	-
→	SG3	-	-	-	5	-	-	3	-	-	-
	SG4	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-

Fonte: Produção do autor.

A segunda avaliação foi realizada para o satélite SAT1 no momento T1, para possibilitar principalmente a mensuração das mudanças na avaliação da escala IRL decorrentes das atividades desenvolvidas entre os momentos T0 e T1 do projeto de desenvolvimento do satélite. Foi utilizada matriz DMM para realizar a avaliação, conforme apresenta a Figura 5.6. A Figura 5.6 destaca na cor vermelha as diferenças na avaliação IRL em relação ao momento avaliado anteriormente (T0), representado na Figura 5.5.

As mudanças na avaliação da escala IRL foram decorrentes de testes realizados por meio de modelos do satélite SAT1 para verificar as interfaces e outros aspectos de integração relacionados às visões de arquitetura B, D e J.

Esta avaliação da escala IRL possibilita que nas entrevistas de avaliação, os entrevistados pudessem visualizar uma aplicação que representasse a evolução da integração do sistema e formar senso crítico para algumas das perguntas previstas. Na apresentação aos entrevistados, foram comentadas quais outras atividades do projeto poderiam resultar em avaliações de níveis

diferentes da escala IRL, como por exemplo testes com o modelo de voo do satélite durante a etapa de integração e testes que levariam a avaliação da escala IRL ao nível 8.

Figura 5.6 – Avaliação da escala IRL do satélite SAT1 no momento T1.

	VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I	VA-J
SS01	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-
SS02	3	3	3	-	-	-	6	-	-	-
SS03	6	6	6	5	-	-	6	-	5	-
SS04	6	7	6	-	-	-	6	-	7	-
SS05	6	7	6	-	6	-	6	-	-	6
SS06	6	7	6	5	7	-	6	-	7	-
SS07	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
SS08	5	6	3	6	-	-	5	3	-	-
SS09	5	6	3	6	-	-	5	-	5	6
SS10	6	6	6	-	-	6	6	-	-	6
SS11	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
SS12	6	6	6	6	-	-	6	5	-	-
SS13	6	6	6	6	-	-	6	-	-	-
SS14	6	6	6	6	-	-	6	5	-	-
SG1	7	6	-	-	6	-	-	-	-	-
SG2	-	-	-	-	6	-	3	-	-	-
SG3	-	-	-	5	-	-	3	-	-	-
SG4	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-

Fonte: Produção do autor.

Já a terceira avaliação foi realizada para o satélite SAT2 no momento T2, a fim de comparar com a avaliação do satélite SAT1 no momento T1 que é equivalente ao momento T2 do SAT2 em termos de final de fase e tomadas de decisão nestes projetos de desenvolvimento. Esta avaliação permite comparar principalmente como é possível representar os impactos de diferentes filosofias de modelos e planos de testes em diferentes projetos, em termos da escala IRL a partir de visões de arquitetura.

Foi utilizada matriz DMM para realizar a avaliação, conforme apresenta a Figura 5.7. A Figura 5.7 destaca na cor vermelha as diferenças na avaliação IRL em relação à fase anterior do projeto de desenvolvimento do satélite SAT2, cuja avaliação IRL foi considerada basicamente de nível 3 para todas as

interações, quando as interfaces foram definidas, e não está representada por uma figura.

A Figura 5.7 representa basicamente que foi considerado o nível 6 da escala IRL para todas as interações do satélite SAT2 no momento T2. Estas avaliações de nível 6 da escala IRL foram ocasionadas por testes ao nível hierárquico de satélite que foram realizados por meio de distintos modelos do satélite, como: modelo de engenharia (EM), estrutural (SM), térmico (TM), radioelétrico (RM) e *mock-up*.

Figura 5.7 – Avaliação da escala IRL do satélite SAT2 no momento T2.

	VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I
SS01	6	6	6	-	-	-	6	-	-
SS02	6	6	6	-	-	-	6	-	-
SS03	6	6	6	-	6	-	6	-	6
SS04	6	6	6	-	-	-	6	-	6
SS05	6	6	6	-	6	-	6	-	-
SS06	6	6	6	-	6	-	6	-	6
SS07	6	6	6	-	-	-	6	-	-
SS08	6	6	6	6	6	-	6	6	-
SS09	6	6	6	6	-	-	6	6	-
SS10	6	6	6	6	-	-	6	-	-
SS11	6	6	6	6	-	-	6	-	-
SS12	6	6	6	-	-	6	6	-	-
SS13	6	6	6	-	-	-	6	-	-
SS14	6	6	6	6	6	-	6	6	-
SS15	6	6	6	6	-	-	6	-	-
SS16	6	6	6	6	6	-	6	6	-

Fonte: Produção do autor.

As próximas duas avaliações da escala IRL foram aplicadas para avaliar a integração de outros dois segmentos do sistema espacial com os subsistemas do satélite SAT1, a fim de exemplificar possíveis aplicações do método proposto nesta dissertação.

A quarta avaliação foi realizada para o segmento SG2 em momento após a realização de testes de integração com o satélite SAT1. Foi utilizada matriz DMM para realizar a avaliação, conforme apresenta a Figura 5.8.

A Figura 5.8 destaca na cor vermelha as diferenças na avaliação IRL após a realização com sucesso dos testes em relação ao momento T1, cuja avaliação IRL foi considerado basicamente de nível 3 para as interações e não está representada por uma figura. Para verificar aspectos da visão de arquitetura K foi utilizado modelo de voo do satélite e realizado um teste integrado, portanto foi considerado como nível 8 da escala IRL. Para verificar aspectos da visão de arquitetura L foram realizados testes com o segmento SG2 e o satélite SAT1 em separado, portanto foi considerado como nível 5 da escala IRL. As visões de arquitetura K e L estão relacionadas a diferentes funcionalidades de um mesmo software.

Figura 5.8 – Avaliação da escala IRL do segmento SG2 após testes realizados.

	VA-K	VA-L	VA-M
SS01	-	-	-
SS02	8	5	-
SS03	8	5	-
SS04	8	5	-
SS05	8	5	-
SS06	8	5	-
SS07	8	5	-
SS08	8	5	3
SS09	8	5	3
SS10	8	5	9
SS11	8	5	9
SS12	8	5	5
SS13	8	5	5
SS14	8	5	5
SG1	-	-	-
SG2	8	5	5
SG3	-	-	5
SG4	9	-	9

Fonte: Produção do autor.

A quinta avaliação foi realizada para o segmento SG3 em momento após a realização de testes de integração com o satélite SAT1. Foi utilizada matriz DMM para realizar a avaliação, conforme apresenta a Figura 5.9.

A Figura 5.9 destaca na cor vermelha as diferenças na avaliação IRL após a realização com sucesso dos testes em relação ao momento T1, cuja avaliação IRL foi considerado basicamente de nível 3 para as interações e não está

representada por uma figura. Para verificar aspectos da visão de arquitetura N foram realizados testes com o segmento SG3 e o satélite SAT1 em separado, portanto foi considerado como nível 5 da escala IRL. Para verificar aspectos da visão de arquitetura O seriam realizados testes integrados com modelo de subsistema do SAT1, portanto foi considerado como nível 6 da escala IRL.

Figura 5.9 – Avaliação da escala IRL de SG3 após testes realizados.

	VA-N	VA-O
SS01	-	-
SS02	-	-
SS03	-	-
SS04	-	-
SS05	-	-
SS06	-	-
SS07	-	-
SS08	-	6
SS09	5	-
SS10	-	-
SS11	-	-
SS12	-	6
SS13	-	-
SS14	-	6
SG1	-	-
SG2	-	-
SG3	5	6
SG4	-	-

Fonte: Produção do autor.

As próximas duas aplicações utilizam diferentes tipos de matrizes, a fim de formar senso crítico para comparar a utilização dos diferentes tipos de matrizes.

A sexta avaliação foi realizada para o satélite SAT1 no momento T1 utilizando uma matriz DSM com informações de visões de arquitetura, a fim de comparar com os resultados obtidos na Figura 5.6 que utilizou matriz DMM para avaliação similar. A Figura 5.10 apresenta esta avaliação.

A matriz DSM com informações de visões de arquitetura foi construída a partir dos dados da matriz DMM com informações de visões de arquitetura (Figura 5.6), com os seguintes dados adicionais:

- 1) Para os segmentos SG2 e SG3, foram consideradas as visões de arquitetura destes segmentos, e as avaliações de IRL no momento T1, que é anterior aos momentos descritos na Figura 5.8 e Figura 5.9.
- 2) A matriz DSM ilustra as interações entre todos os pares de elementos do sistema, de uma maneira que a matriz DMM não possibilita ilustrar. Assim, algumas avaliações IRL adicionais são exibidas na matriz DSM, como nas interações a seguir:
 - a. Na visão de arquitetura A, são ilustradas interações mais detalhadas entre o subsistema SS04 e os subsistemas SS06 e SS07, e a interação do subsistema SS07 com os demais subsistemas.
 - b. Na visão de arquitetura H, são ilustradas mais interações entre os subsistemas que possuem interações relacionadas a esta visão de arquitetura.
 - c. As visões de arquitetura D, E, F e J foram mescladas por terem a mesma natureza de interface, e são ilustradas mais interações entre os subsistemas que interagem nestas visões de arquitetura.

Figura 5.10 – Avaliação da escala IRL de SAT1 em T1 com matriz DSM.

	SS01	SS02	SS03	SS04	SS05	SS06	SS07	SS08	SS09	SS10	SS11	SS12	SS13	SS14	SG1	SG2	SG3	SG4
SS01	-	3	3	6	3	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6			
SS02	3	3	-	6	6	6	6	6	3	6	3	3	6	6	6	6	3	
SS03	6	6	-	7		7	6	6		5	5					3		
SS04	3	7	6	7	-		6	6	6							3		
SS05	7	6				-	7	6	6		5	6			6	6	3	
SS06	7	6	6	7	6	6	7	6		-	6	6	5	5	5	6	6	6
SS07	6	3	6	6	6	6	6	6		-	5	5	6	6	6	6	6	7
SS08	6	3					5	5		5	-	5			3		3	3
SS09	6	3	5	5		5	5	5	5	5		5	-	5	5	5	5	5
SS10	6	6				6	6	6	6		5						3	5
SS11	6	6					6	6	6								3	
SS12	6	6					6	6	6	3	5				-	7	7	
SS13	6	6					6	6	6	6	5				7	-	7	
SS14	6	6					6	6	6	3	5				7	7	-	
SG1	6					6		7										
SG2		3	3	3	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SG3							3		3	5			5		5		6	-
SG4											6					9		-

- A Visão de Arquitetura A
- G Visão de Arquitetura G
- D Visões de Arquitetura D E F J
- B Visão de Arquitetura B
- H Visão de Arquitetura H
- K Visões de Arquitetura K L M N O
- C Visão de Arquitetura C
- I Visão de Arquitetura I

Fonte: Produção do autor.

A última avaliação IRL foi realizada para o satélite SAT1 no momento T1 utilizando uma matriz DSM tradicional, sem a utilização de visões de arquitetura, a fim de comparar com os resultados obtidos na Figura 5.10 deste documento que utilizou matriz DSM com informações de visão de arquitetura para a mesma avaliação. A Figura 5.11 apresenta esta avaliação.

Para transformar a matriz DSM com informações de visões de arquitetura, apresentada na Figura 5.10, em uma matriz DSM tradicional no formato em que a escala IRL é comumente avaliada, foram consideradas as regras do método proposto nesta dissertação.

Figura 5.11 – Avaliação da escala IRL de SAT1 em T1 com matriz DSM tradicional.

	SS01	SS02	SS03	SS04	SS05	SS06	SS07	SS08	SS09	SS10	SS11	SS12	SS13	SS14	SG1	SG2	SG3	SG4
SS01	9	3	6	3	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	0
SS02	3	9	6	6	6	6	3	3	3	6	6	6	6	6	0	3	0	0
SS03	6	6	9	7	0	6	6	0	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0
SS04	3	6	7	9	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
SS05	7	6	0	0	9	6	6	0	5	6	0	0	0	0	6	3	0	0
SS06	7	6	6	6	6	9	6	5	5	6	6	6	6	6	0	3	3	0
SS07	6	3	6	6	6	6	9	5	5	6	6	6	6	6	7	3	0	0
SS08	6	3	0	0	0	5	5	9	5	0	0	3	0	3	0	3	3	0
SS09	6	3	5	0	5	5	5	5	9	5	0	5	5	5	0	3	5	0
SS10	6	6	0	0	6	6	6	0	5	9	0	0	0	0	0	3	0	6
SS11	6	6	0	0	0	6	6	0	0	0	9	0	0	0	0	3	0	0
SS12	6	6	0	0	0	6	6	3	5	0	0	9	7	7	0	3	5	0
SS13	6	6	0	0	0	6	6	0	5	0	0	7	9	7	0	3	0	0
SS14	6	6	0	0	0	6	6	3	5	0	0	7	7	9	0	3	5	0
SG1	6	0	0	0	6	0	7	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0
SG2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	9	6	9
SG3	0	0	0	0	0	3	0	3	5	0	0	5	0	5	0	6	9	0
SG4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	9	0	9

Fonte: Produção do autor.

5.2.5. Aplicação da escala SRL

Para calcular o nível SRL do satélite SAT1 no momento T1, foram utilizados os dados de níveis de TRL e IRL das Seções 5.2.3 e 5.2.4 deste documento, e o método de cálculo da escala SRL (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017).

O primeiro passo para cálculo do nível SRL foi a multiplicação de matrizes das avaliações realizadas com as escalas IRL e TRL. Foram tomados os níveis de IRL da Figura 5.11, considerando apenas os subsistemas do satélite e não considerando os segmentos externos ao satélite, e os valores de níveis de TRL da Tabela 5.4. Estes valores são divididos por 9 (nível máximo das escalas TRL e IRL) para normalização. Assim o primeiro resultado parcial foi um vetor, conforme cálculo a seguir, da Equação 5.1.

$$(0,44 + 0,40 + 0,40 + 0,37 + 0,43 + 0,46 + 0,45 + 0,34 + 0,39 + 0,43 + 0,44 + 0,40 + 0,47 + 0,44) / 14 = 0,42$$

(5.3)

Assim, o nível SRL do sistema calculado para o satélite SAT1 no momento T1 é 0,42. Ao calcular o nível SRL do sistema em diferentes momentos de seu projeto, seria possível comparar estes dados e acompanhar sua evolução de maturidade.

5.3. Avaliação por entrevistas

Esta seção analisa os resultados dos dados de avaliação, que foram coletados em entrevistas com o grupo focal exploratório e o grupo focal confirmatório com o auxílio de um questionário, conforme descrito na seção de metodologia. A análise está separada em duas partes: avaliação da aplicação da escala IRL e avaliação da aplicação da escala IRL a partir de visões de arquitetura.

A análise considerou os dados obtidos através das respostas dos entrevistados. As entrevistas de código de identificação 7 e 8, relativas a profissionais da área de dependabilidade, possuem somente uma resposta a uma das perguntas do questionário pois julgaram que a escala IRL não se relaciona diretamente com suas atividades. Desta maneira foi considerado que as demais perguntas não se aplicam a estas entrevistas, e não foram consideradas para a análise.

5.3.1. Avaliação da escala IRL

Ao avaliar a utilidade da escala IRL, todos os respondentes consideraram que a escala IRL poderia ser útil para análise de arquitetura e acompanhamento da evolução da integração do sistema.

Ao avaliar a eficácia da escala IRL, todos os respondentes consideraram que a avaliação através da escala IRL complementa a avaliação através da escala TRL. Em uma escala de 1 a 5 para avaliar o quanto a escala IRL consegue representar a maturidade do esforço de integração do sistema, o grupo focal exploratório considerou em média nota 4, enquanto que o grupo focal confirmatório considerou em média nota 4,5.

A Tabela 5.6 apresenta uma compilação das contribuições dos entrevistados, frente ao questionamento de como a escala IRL poderia se relacionar com suas atividades no projeto de desenvolvimento do satélite. As respostas estão separadas de acordo com as funções dos entrevistados no projeto de desenvolvimento, e adaptadas em algumas informações a fim de preservar o sigilo do estudo de caso.

Tabela 5.6 – Como a escala IRL poderia se relacionar com as atividades no projeto.

Função	Respostas
Arquitetos de sistema	<p>Poderia ser utilizado no momento da criação do plano de desenvolvimento e verificação do satélite.</p> <p>No caso do computador de bordo, os níveis IRL podem se relacionar como métricas das diversas interfaces que o subsistema possui.</p>
Dependabilidade	<p>Considerando o contexto de desenvolvimento de sistemas espaciais do INPE/ETE, onde as análises de dependabilidade ocorrem nas fases iniciais do projeto (descida do "V") e não dependem diretamente do quanto os elementos já foram testados, é possível concluir que a escala IRL não se relaciona diretamente com as atividades do grupo de dependabilidade.</p>
Garantia do produto	<p>A comparação da classificação da escala IRL com a realidade do projeto naquele momento (<i>milestone</i>) orienta sobre o nível de cobrança (a ser exigida pela garantia do produto).</p>

continua

Tabela 5.6 – Conclusão.

Função	Respostas
Verificação	<p>A importância básica da escala IRL para verificação é acompanhar a evolução da integração do sistema. Uma dificuldade poderia ser de realizar a avaliação entre curtos períodos de tempo, já que no estudo de caso realizado aparentemente a escala consegue captar a evolução em grandes períodos de tempo. Se a avaliação da escala IRL fosse realizada após as atividades de AIT do satélite, seria possível visualizar o quanto que as atividades de verificação poderiam influenciar a avaliação da escala IRL.</p> <p>A escala IRL parece ser interessante como uma ferramenta de comunicação gerencial, permitindo a avaliação da integração através de uma escala objetiva. A partir desta avaliação também poderiam ser criados alertas para identificar pontos que necessitariam maior atenção.</p>
Análise de missão	<p>Quando aplicada no início de um projeto, a escala poderia auxiliar a avaliar o estágio atual e dificuldades que poderiam ser encontradas nas próximas atividades do projeto, que é um dos grandes desafios que se tem.</p>
Engenharia de sistemas	<p>Para o acompanhamento gerencial.</p>

Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

Dentre as aplicações sugeridas para a escala IRL, categorizadas pelo autor em três tipos, os entrevistados selecionaram as que lhe despertaram maior interesse. A Tabela 5.7 apresenta os tipos de aplicações da escala IRL e os resultados das respostas, separados pelas funções dos entrevistados no projeto. O caractere “X” indica as respostas selecionadas, e na função de arquitetos de sistema é mostrado quantas indicações positivas houveram dentro os cinco respondentes.

Tabela 5.7 – Tipos de aplicações da escala IRL que despertaram maior interesse.

Tipos de aplicações Função	Análise da arquitetura do sistema e quantificar impactos de mudanças.	Acompanhamento da evolução da integração do sistema.	Análises numéricas utilizando a escala IRL.
Arquitetos de sistema	X (5/5)	X (3/5)	X (2/5)
Garantia do produto	-	X	-
Verificação	-	X	-
Análise de missão	X	X	X
Engenharia de sistemas	X	X	X

Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

Os respondentes também foram questionados se conseguiriam identificar outras possíveis aplicações da escala IRL, que não foram apresentadas durante a entrevista. A Tabela 5.8 apresenta uma compilação das respostas dos entrevistados. As respostas estão separadas de acordo com as funções dos entrevistados no projeto de desenvolvimento.

Tabela 5.8 – Outras possíveis aplicações identificadas para a escala IRL.

Função	Respostas
Arquitetos de sistema	Relacionamento com os estudos de risco (" <i>Risk Analysis</i> "). Obtido um SRL para um determinado projeto e num instante do seu ciclo de vida, um sistema baseado em regras poderia ser alocado para "sugerir" ações corretivas, se acaso for, a um gestor de projeto ou arquiteto.
Garantia do produto	Mapeamento para requisitos das fases dos programas.
Verificação	Seria interessante definir qual seria o SRL desejado para o início das atividades de integração.
Análise de missão	Poderia ser utilizada para avaliar a maturidade da infraestrutura de teste do satélite.
Engenharia de sistemas	Acompanhamento gerencial para coordenadores e diretores.

Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

Durante a entrevista foi questionado se aplicações numéricas da literatura derivadas das escalas de maturidade (TRL, IRL, SRL), como as aplicações citadas, poderiam lhe ser úteis, e quais delas. Durante a apresentação prévia ao questionário, haviam sido ilustradas aplicações como parâmetro acoplado à gestão de valor agregado associados a custo e prazo em *Earned Value Management* - EVM (MAGNAYE et al., 2014), e como auxílio ao plano de desenvolvimento de sistemas (MAGNAYE; SAUSER; RAMIREZ-MARQUEZ, 2010). As respostas estão compiladas na Tabela 5.9 e separadas de acordo com as funções dos entrevistados no projeto de desenvolvimento.

Tabela 5.9 – Utilidade de aplicações numéricas derivadas das escalas de maturidade.

Função	Respostas
Arquitetos de sistema	Sim. Sim. Todas são.
Garantia do produto	Sim. Todas dependendo da fase do programa e do que está sendo avaliado.
Verificação	Sim.
Análise de missão	Sim. Seria interessante o SRL para ter uma ideia geral da integração. Em relação à associação com informações de custo, poderia ser mais difícil conseguir contabilizar com precisão o custo de desenvolvimento de novos equipamentos, já com o uso de itens de prateleira a precisão poderia ser maior.
Engenharia de sistemas	Sim. Valores <i>versus</i> fase, ou <i>versus</i> verificação.

Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

Ainda foi questionado se a importância da escala IRL poderia ser maior no contexto do programa CBERS, no qual o sistema é desenvolvido e testado em conjunto por dois países. Metade dos respondentes responderam que sim e outra metade respondeu que talvez, não houve nenhuma resposta negativa. Esta distribuição de respostas foi igual tanto no grupo focal exploratório como no grupo focal confirmatório.

Ao final da entrevista foi aberta a oportunidade para os entrevistados deixarem comentários opcionais sobre a escala IRL, a pesquisa, o questionário ou outros temas não cobertos pela entrevista. Os comentários registrados estão compilados na Tabela 5.10 e separados de acordo com as funções dos entrevistados no projeto de desenvolvimento.

Tabela 5.10 – Comentários opcionais ao final da entrevista.

Função	Respostas
Arquitetos de sistema	Sugestão: colocar gradações de cores (por exemplo 3 níveis) para identificar níveis IRL baixos, médios e altos, a fim de melhorar a visualização das matrizes IRL.
Garantia do produto	Eu gostaria de ter o mapeamento mencionado anteriormente.
Verificação	-
Análise de missão	<p>Esta ferramenta ainda não é utilizada no INPE, portanto as respostas a este questionário são mais teóricas.</p> <p>Para implementar esta ferramenta em projetos do INPE possivelmente necessitaria de pessoal que conheça o sistema e conheça a metodologia da ferramenta. No entanto, a principal dificuldade seria dedicar pessoal a esta atividade, devido às atuais condições de restrições de recursos para execução dos projetos.</p>
Engenharia de sistemas	A pergunta sobre a eficácia da escala IRL em representar a maturidade do esforço de integração do sistema recebeu a nota 4, devido à percepção de que algumas avaliações do estudo de caso classificados como TRL e IRL em nível 3 poderiam estar informando níveis de risco acima dos níveis reais percebidos, já que são utilizadas tecnologias e processos já dominados.

Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

5.3.2. Avaliação da aplicação a partir de visões de arquitetura

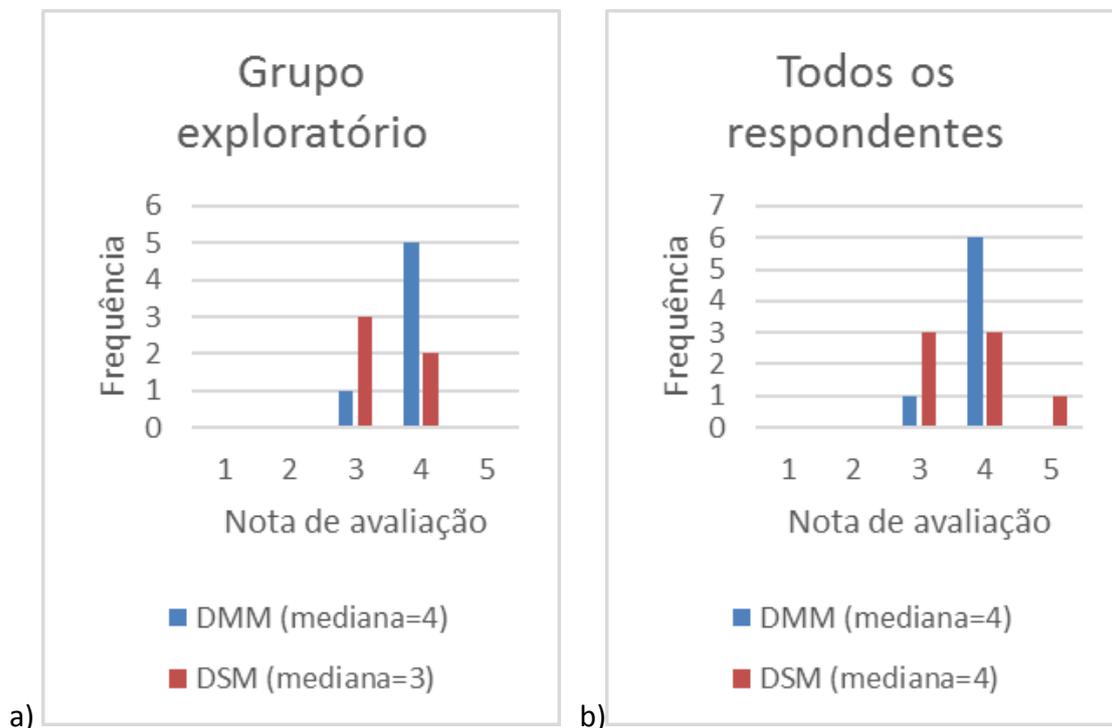
Ao questionar se poderia ser útil avaliar a escala IRL a partir de visões de arquitetura, todos os respondentes consideraram que sim.

Ao avaliar a utilidade dos artefatos propostos, todos os respondentes consideraram que ambos, tanto a matriz DSM como a matriz DMM, poderiam ser úteis para avaliar a escala IRL a partir de visões de arquitetura.

A fim de avaliar a eficácia dos artefatos propostos, foram elaboradas quatro questões relativas às características esperadas dos artefatos. Os resultados destas questões são apresentados a seguir, agrupando as respostas de acordo com os grupos focais estabelecidos, exploratório e confirmatório. Os gráficos apresentam o histograma das respostas, que poderiam ser números discretos de 1 a 5, sendo 5 a avaliação mais positiva. Foi calculada a mediana de cada amostra sendo avaliada, de forma a tomar o valor central da amostra e representa-la de uma maneira mais aderente às possíveis respostas da pergunta, que possuem valores discretos.

A primeira questão foi para avaliar a facilidade para realizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura, e as respostas estão representadas na Figura 5.12. O grupo exploratório, que consiste em profissionais na função de arquitetos de sistema, foi que mais praticou a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura por meio dos artefatos propostos. Suas respostas estão representadas na Figura 5.12.a, indicando uma preferência para a matriz DMM. Como apenas dois membros do grupo confirmatório praticaram a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura por meio dos artefatos propostos e responderam a esta questão, a Figura 5.12.b representa as respostas de todos os respondentes, e não apenas as respostas do grupo confirmatório. Ao considerar todos os respondentes, as notas de avaliação das matrizes DSM e DMM possuem a mesma mediana, igual a 4. Vale notar que os demais membros do grupo confirmatório apenas visualizaram a avaliação da escala IRL, e não praticaram a realização da avaliação.

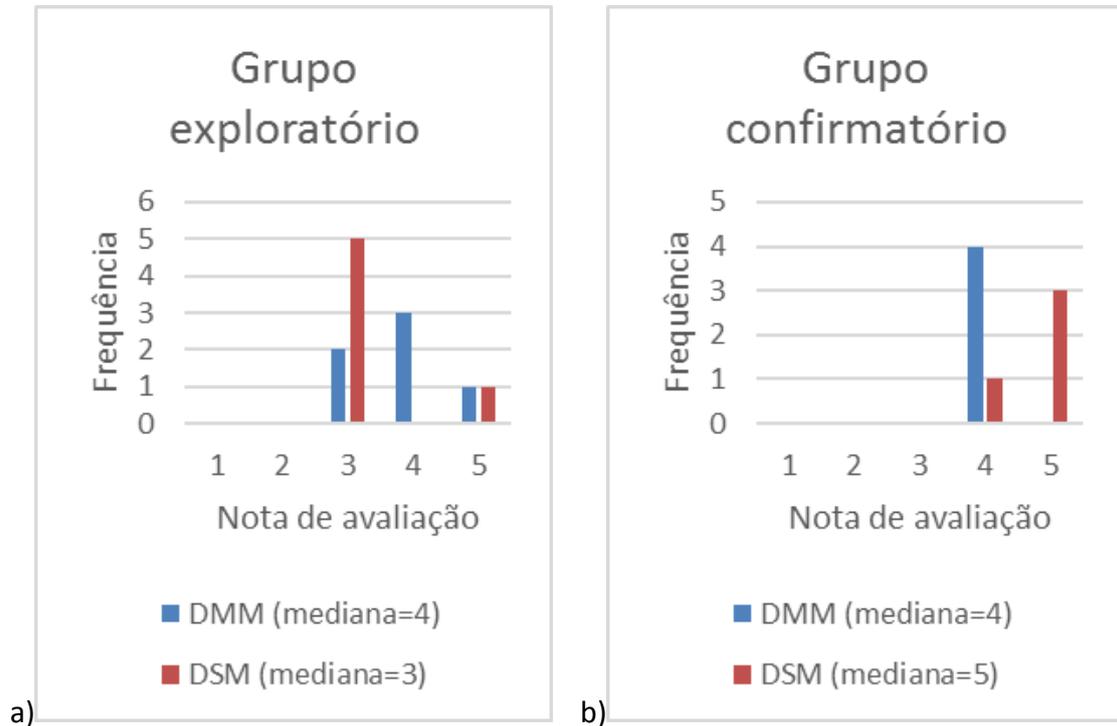
Figura 5.12 – Facilidade para realizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura.



Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

A segunda questão foi para avaliar a facilidade para visualizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura, e as respostas estão representadas na Figura 5.13. É possível notar uma preferência do grupo exploratório pela matriz DMM, e uma preferência do grupo confirmatório pela matriz DSM.

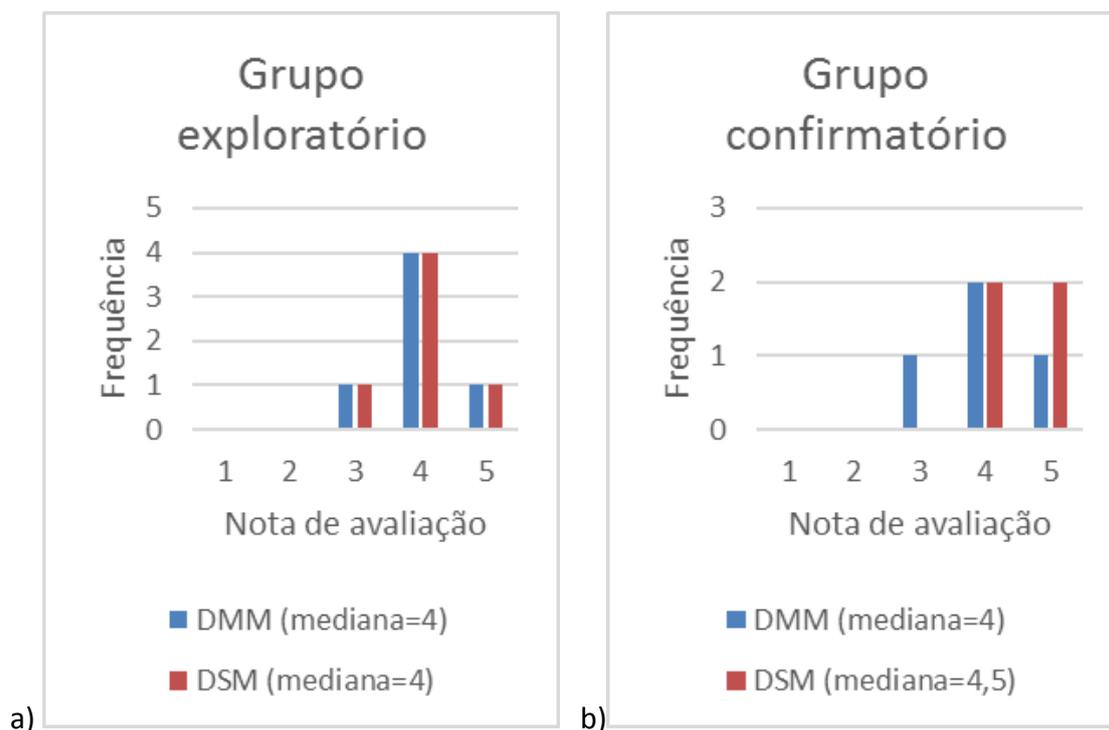
Figura 5.13 – Facilidade para visualizar a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura.



Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

A terceira questão foi para avaliar a capacidade de ressaltar as interações entre os elementos do sistema, e as respostas estão representadas na Figura 5.14. Observa-se que o grupo exploratório avaliou de maneira similar tanto a matriz DMM como a matriz DSM, enquanto que o grupo confirmatório avaliou a matriz DSM um pouco melhor que a matriz DMM.

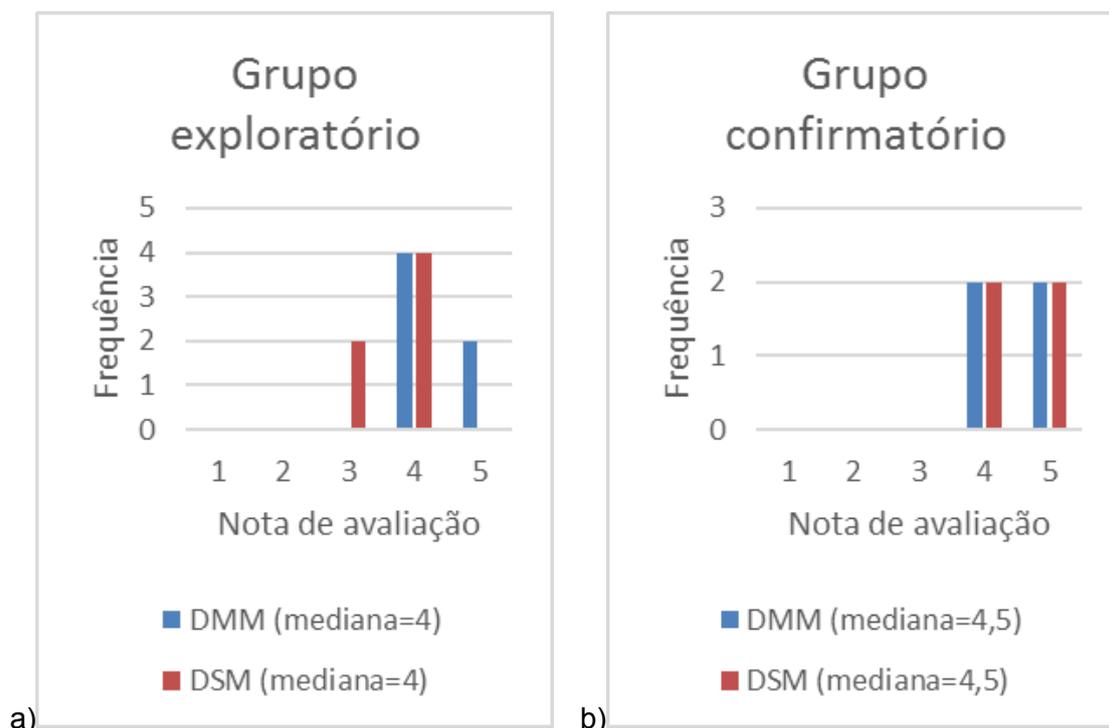
Figura 5.14 – Capacidade de ressaltar as interações entre os elementos do sistema.



Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

A quarta questão foi para avaliar a capacidade de ressaltar as múltiplas visões de arquitetura do sistema, e as respostas estão representadas na Figura 5.15. Para o grupo exploratório, ambas as matrizes foram avaliadas de maneira similar. No caso do grupo exploratório, embora a mediana de ambas avaliações possua o mesmo valor, analisando os dados das entrevistas podemos perceber que 4 dos 6 respondentes avaliaram melhor a matriz DMM e outros dois respondentes avaliaram as duas matrizes com a mesma nota. Desta maneira, podemos considerar que houve uma preferência do grupo exploratório pela matriz DMM para esta questão.

Figura 5.15 – Capacidade de ressaltar as múltiplas visões de arquitetura do sistema.



Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

Finalmente, foi questionado qual a potencial importância das capacidades de análise gráfica e análise numérica para os artefatos propostos, elencados inicialmente como capacidades esperadas e desejáveis, respectivamente. As respostas poderiam ser números discretos de 1 a 5, sendo 5 a avaliação mais positiva. A Tabela 5.11 apresenta os resultados desta questão por meio da mediana e média das amostras de dados, organizadas pelos dois grupos focais estabelecidos. No grupo exploratório é possível notar avaliações levemente superior em ordem decrescente para as capacidades apresentadas. Já no grupo confirmatório ficou mais acentuada a potencial importância para as capacidades de análises gráficas, seguida pela capacidade de análise numérica de extrair índices compostos já existentes (como o SRL), e por último a potencial capacidade de análise numérica de extrair possíveis índices compostos voltados para visões de arquitetura.

Tabela 5.11 – Potencial importância das capacidades de análise gráfica e numérica.

Avalie a potencial importância das seguintes capacidades:	Grupo exploratório		Grupo confirmatório	
	Mediana	Média	Mediana	Média
Ressaltar as interações entre os elementos do sistema.	4	4,3	5	4,8
Ressaltar as múltiplas visões de arquitetura do sistema.	4	4,2	5	4,8
Extrair índices compostos já existentes (como o SRL).	4	4,0	4	4,3
Extrair possíveis índices compostos voltados para visões de arquitetura.	4	3,8	4	3,7

Fonte: Produção do autor. Baseado nos dados do Apêndice B.

5.4. Discussão

Esta seção apresenta a discussão relacionada aos resultados obtidos nas seções anteriores, de desenvolvimento da teoria, condução do estudo de caso e condução das entrevistas de avaliação da escala IRL e de sua aplicação a partir de visões de arquitetura.

Primeiramente é discutida a escala IRL, para depois discutir o método proposto de aplicação a partir de visões de arquitetura. Ao final é realizada a explicitação de aprendizagens em relação à utilização da metodologia *Design Science*.

5.4.1. Discussão sobre a escala IRL

A avaliação da escala IRL por meio das entrevistas, de maneira geral, apresentou resultados positivos para a escala. Todos os respondentes consideraram que a escala IRL poderia ser útil para análise de arquitetura e acompanhamento da evolução da integração do sistema, e consideraram que a avaliação através da escala IRL complementa a avaliação através da escala TRL.

Exemplificando a complementariedade entre as escalas TRL e IRL, vale destacar que no estudo de caso realizado a escala IRL conseguiu representar eventos ocorridos entre os momentos T0 e T1 do desenvolvimento do satélite SAT1 enquanto que a escala TRL não conseguiu representa-los, conforme descrito ao final da seção 5.2.3. Estes eventos consistiram em testes de interfaces e testes referentes ao nível hierárquico de sistema, que não foram suficientes para modificar a avaliação de maturidade por meio da escala TRL para os subsistemas e para o sistema do estudo de caso, enquanto que a avaliação por meio da escala IRL foi diferente após a realização destes testes.

Em relação à eficácia da escala IRL em representar a maturidade do esforço de integração do sistema, o grupo focal exploratório considerou em média nota 4, enquanto que o grupo focal confirmatório considerou em média nota 4,5, em uma escala de 1 a 5, portanto foi uma avaliação positiva.

Sobre esta questão, um dos comentários dos entrevistados foi de que sua nota não foi a nota máxima devido à percepção de que algumas avaliações do estudo de caso classificados como TRL e IRL em nível 3 poderiam estar informando níveis de risco acima dos níveis reais segundo sua percepção, já que são utilizadas tecnologias e processos já dominados. A partir deste comentário, o autor sugere que futuras pesquisas poderiam explorar indicadores complementares à escala IRL, assim como são utilizados indicadores para a escala TRL como o grau de dificuldade em avançar entre níveis da escala TRL chamada de R&D3 (MANKINS, 2009b). Possíveis indicadores complementares também poderiam tentar representar o risco

associado à integração, de acordo com resultados de verificação por análise, já que a escala IRL em seus níveis de 4 a 7 consideram apenas a verificação por testes.

Ainda sobre a questão da eficácia da escala IRL em representar a maturidade do esforço de integração do sistema e também sobre a questão de complementariedade entre as escalas TRL e IRL, houve um comentário de um entrevistado que não pôde ser capturado no questionário, mas que vale a pena ser explicitado pelo autor, pois corrobora com estas duas questões. O comentário foi de que “a escala IRL representa as atividades de sistema”, feito pelo primeiro entrevistado (de identificação ID 1 na Tabela B.1), que é arquiteto de sistema, após o autor apresentar os níveis da escala IRL, sendo que inicialmente o entrevistado havia argumentado que a escala TRL bastaria já que os requisitos do sistema são derivados para os subsistemas, que por sua vez o seu desenvolvimento poderia ser avaliado pela escala TRL. Esta afirmação pode estar relacionada ao fato de que, na organização do projeto e pacotes de atividades de desenvolvimento do estudo caso, há uma separação entre as atividades relacionadas ao nível hierárquico de sistema, neste caso o satélite, e ao nível hierárquico dos subsistemas do satélite.

Também relacionado com a questão da eficácia da escala IRL, o autor expressa que o fato do estudo de caso do satélite SAT1 apresentar muitas mudanças a partir de um satélite já existente trouxe uma dificuldade adicional em realizar e compreender as avaliações da escala IRL durante a condução do estudo de caso. A literatura da escala IRL ainda não apresenta regras explícitas relativas a impactos de mudanças no sistema, e o autor organizou sua própria consideração conforme a Tabela 5.5, que apresenta tais regras consideradas. De fato, a literatura da escala TRL já apresenta estas considerações conforme a Tabela 5.3, e mesmo assim o impacto de mudanças no sistema é um dos desafios mais prioritários para melhorar a utilização da escala TRL (TOMASCHEK et al., 2016). Desta maneira, o autor sugere que futuras pesquisas poderiam explorar e consolidar as considerações para a escala IRL relativas a mudanças no sistema.

Em relação às aplicações da escala IRL que despertaram maior interesse nos entrevistados, conforme apresenta a Tabela 5.7, é interessante notar que:

- A aplicação que despertou maior interesse aos arquitetos de sistema foi a análise de arquitetura do sistema e quantificar impactos de mudanças, esta aplicação também foi selecionada por entrevistados das funções de análise de missão e engenharia de sistema;
- A aplicação de acompanhamento da evolução da integração do sistema foi mencionada pela maior parte dos arquitetos de sistema e por todos os outros entrevistados, que representam outras funções no projeto de desenvolvimento;
- A aplicação de análises numéricas utilizando a escala IRL foi selecionada por entrevistados das funções de análise de missão e engenharia de sistema e parte dos entrevistados da função de arquitetos de sistema.

Os resultados das perguntas relativas a como a escala IRL poderia se relacionar com as atividades no projeto, apresentadas na Tabela 5.6, relativas a outras possíveis aplicações identificadas para a escala IRL, apresentadas na Tabela 5.8, e relativas à utilidade de aplicações numéricas derivadas das escalas de maturidade, apresentadas na Tabela 5.9, estão alinhados com a discussão apresentada no parágrafo anterior. Relacionados à aplicação de análise de arquitetura do sistema, foram identificadas possíveis relações com atividades de análise técnica, estudos de risco e com o plano de desenvolvimento e verificação do satélite. Relacionados à aplicação de acompanhamento da evolução da integração do sistema, foram identificadas possíveis relações com atividades de apoio à tomada de decisão, como o nível de cobrança a ser exigida pela função de garantia do produto, alertas para as funções de arquitetos de sistema e verificação, e mesmo avaliar a maturidade da infraestrutura de testes do satélite. Os resultados também destacam o papel da escala IRL de ser uma ferramenta de comunicação gerencial. Os resultados da Tabela 5.8 também apontam um interesse de parte dos entrevistados em

saber quais seriam os requisitos ou níveis de maturidade desejados para cada uma das fases do desenvolvimento do sistema, e para pontos críticos de tomada de decisão como o início das atividades de montagem, integração e testes (AIT). Os entrevistados da função de dependabilidade consideraram que a escala IRL não se relaciona com o escopo atual de suas atividades.

Especificamente em relação à tomada de decisão sobre o nível de cobrança a ser exigido pela função de garantia do produto, o autor sugere que esta aplicação também poderia estar relacionada com a identificação e controle de itens críticos do projeto. Pois assim como a escala TRL pode auxiliar na identificação e controle de itens críticos de tecnologias do projeto de acordo com ECSS (2017), a escala IRL também poderia auxiliar na identificação e controle de itens críticos, caso haja itens críticos relacionados à integração entre elementos do sistema. Esta questão poderá ser melhor explorada em futuras pesquisas.

Em relação a aplicações numéricas associadas a custo, foi comentado por um entrevistado que poderia ser mais difícil contabilizar com precisão o custo de desenvolvimento de novos equipamentos em relação ao custo de aquisição de equipamentos já desenvolvidos, conforme apresenta a Tabela 5.9.

Os entrevistados apresentaram opiniões igualmente divididas entre sim e talvez, quando questionados se no contexto do programa CBERS, no qual o sistema é desenvolvido e testado em conjunto por dois países, a importância da escala IRL poderia ser maior. Esta questão poderá ser aprofundada em futuras pesquisas.

Um comentário, registrado na Tabela 5.10, que vale a pena notar é que a escala IRL ainda não é utilizada de maneira sistemática nos projetos de desenvolvimento do INPE, portanto os entrevistados possuem pouca experiência com a escala IRL.

De maneira geral, os resultados desta pesquisa contribuem com dados empíricos no sentido de validar a utilidade e eficácia da escala IRL nas

aplicações propostas atualmente na literatura e descritas nesta pesquisa, para o estudo de caso realizado e grupo de profissionais entrevistado.

5.4.2. Discussão sobre o método proposto

A avaliação do método proposto obteve resultados positivos, sendo que todos os respondentes consideraram que poderia ser útil avaliar a escala IRL a partir de visões de arquitetura, e também que ambas as matrizes propostas (DSM e DMM) poderiam ser úteis para este fim.

Por meio do estudo de caso, foi possível demonstrar que ao aplicar o método proposto foi possível avaliar a maturidade de integração de elementos tecnológicos a partir das diferentes visões de arquitetura de um sistema, que era a funcionalidade esperada para os artefatos propostos. E, ainda, foi possível mostrar que o método proposto é uma solução viável para resolver os dois problemas apontados anteriormente na aplicação da escala IRL, onde as matrizes propostas nas abordagens tradicionalmente utilizadas não incorporam informações sobre os tipos de interações entre os elementos do sistema e tampouco separam os diferentes tipos de interações entre mesmos elementos do sistema para estabelecer possíveis diferentes níveis da escala IRL.

O autor expressa que, ao conduzir o estudo de caso, a utilização de visões de arquitetura auxiliou a organizar a análise do sistema e aplicar a escala IRL, já que os satélites do estudo de caso já possuíam visões de arquitetura definidas, sendo utilizadas em sua documentação e na organização de seus projetos de desenvolvimento. As descrições estavam relacionadas simplesmente como arquiteturas, sem a relação com o conceito de visões de arquitetura que o autor identificou. Por exemplo, esta documentação incluía relatórios técnicos dedicados a cada visão de arquitetura, produzidos pelos arquitetos de sistema responsáveis por cada visão de arquitetura, que foram utilizados a fim de mapear o sistema e utilizados como base para realizar as avaliações de maturidade por meio da escala IRL. Este fato mostra que as visões de

arquitetura realmente são úteis para organizar a análise de sistemas complexos (MAIER; RECHTIN, 2000), e está de acordo com a constatação de que um arquiteto de sistema projeta a visão do sistema e comunica essa visão entre as partes interessadas (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016). Desta maneira, o autor conclui que o método proposto teve boa adequação para utilização neste estudo de caso. Vale notar que o autor propôs duas visões de arquitetura adicionais para o satélite SAT1 a fim de melhorar a análise do sistema, complementando as outras oito visões de arquitetura existentes em seu projeto, sendo que os arquitetos de sistema responsáveis concordaram com a utilidade desta proposta.

O estudo de caso também contém a análise de outros dois segmentos, além do segmento espacial, ou satélite. Para análise destes dois segmentos, o autor propôs visões de arquitetura que expressassem as principais interações dos segmentos com o satélite a fim de enriquecer o estudo de caso, já que estas visões de arquitetura não existiam oficialmente na documentação de projeto. Desta maneira, foi demonstrado que é possível criar visões de arquitetura para auxiliar a avaliação da escala IRL de um sistema que ainda não possui visões de arquitetura definidas. O autor expressa que, nestes casos, a utilização de visões de arquitetura auxiliou a separar e destacar as principais interações entre os segmentos, e no caso das visões de arquitetura K e L foi possível facilitar a expressão destas interações já que elas dependem de funcionalidades de software e hardware que poderiam ser mais complexos de serem representados sem a utilização de visões de arquitetura. Desta maneira, a utilização de visões de arquitetura poderia auxiliar a expressar a integração entre elementos tecnológicos, alinhado com um dos objetivos da escala IRL que é de ser uma ferramenta de comunicação a partes interessadas do sistema sendo avaliado. Esta colocação está alinhada com Maier e Rechtin (2000), que sugerem que à medida que utilizamos sistemas complexos centrados em informação, teremos que aceitar a existência de muitas visões de arquitetura, cada uma representando diferentes preocupações, e cada uma delas direcionada a um público-alvo diferente, devido a que a hierarquia de sistemas

de informação pode ser mais complexa de se representar em relação a sistemas não informatizados (MAIER; RECHTIN, 2000).

Ambos artefatos propostos, a matriz DSM e a matriz DMM, foram bem avaliados em termos de sua eficácia, nas quatro questões relativas às características esperadas dos artefatos, apresentados nos resultados da seção 5.3.2 e por meio das figuras 5.11 a 5.14. É possível perceber nestes resultados uma melhor avaliação geral para a matriz DMM por parte do grupo exploratório, representado pelos arquitetos de sistema, e uma melhor avaliação geral para a matriz DSM por parte do grupo confirmatório, representado por outras funções em um projeto de desenvolvimento. O autor sugere que uma possível explicação desta preferência dos arquitetos de sistema pela matriz DMM poderia ser pelo fato de já estarem mais acostumados ao grau de abstração das visões de arquitetura e o que elas representam, no entanto, esta hipótese necessitaria ser validada em futuras pesquisas.

Continuando esta discussão, também é possível notar que a matriz DMM obteve uma avaliação geral levemente superior na capacidade de ressaltar as múltiplas visões de arquitetura do sistema, representada na Figura 5.15, enquanto que a matriz DSM obteve uma avaliação geral levemente superior na capacidade de ressaltar as interações entre os elementos do sistema, representada na Figura 5.14. Esta complementariedade das capacidades de ambas as matrizes propostas também pode ser notada no estudo de caso, como representado na Figura 5.10 e explorado no texto de sua explicação, onde a matriz DSM permitiu um detalhamento maior de interações entre os elementos do sistema, enquanto que apresentou limitações para apresentar muitas visões de arquitetura no mesmo gráfico, em relação à matriz DMM da Figura 5.6. Em alguns casos, o menor detalhamento de interações pode até ser interessante quando se deseja uma comunicação mais simplificada com menor nível de detalhamento entre as partes interessadas. Estes resultados vêm a confirmar as possíveis vantagens e desvantagens previamente anunciadas para estes dois artefatos, de acordo com a Tabela 5.2.

Ainda, se considerarmos os fatos de que, na avaliação, os arquitetos de sistema mostraram certa preferência pela matriz DMM e para potenciais aplicações de análise de arquitetura ao utilizar a escala IRL, conforme discussão na seção 5.4.1, o autor sugere que a matriz DMM poderia ser mais propícia de ser utilizada ao realizar aplicações de análise de arquitetura, onde o maior enfoque na organização do sistema e maior nível de abstração das visões de arquitetura sejam mais adequados. Corrobora para esta formulação a constatação de que uma das principais funções de um arquiteto de sistema é decidir se e como integrar novas tecnologias na arquitetura do sistema (CRAWLEY; CAMERON; SELVA, 2016). Por outro lado, para a aplicação de acompanhamento de integração do sistema, seria importante que a matriz DSM fosse utilizada, por ser uma ferramenta de comunicação gerencial entre várias partes interessadas do projeto, com menor nível de abstração, já que sua aceitação foi maior no grupo focal confirmatório, conforme discussão na seção 5.4.1. Estas sugestões não excluem a possibilidade de que ambas as matrizes sejam utilizadas em ambas as aplicações, são apenas sugestões do autor que também precisam ser futuramente validadas por outros estudos de casos.

Nas entrevistas também foi avaliado qual seria a potencial importância das capacidades de análise gráfica e análise numérica para os artefatos propostos, elencados na Seção 5.1 como capacidades esperadas e desejáveis dos artefatos. Os resultados estão representados na Tabela 5.11. Todas as capacidades foram bem avaliadas, mas é possível notar uma potencial importância levemente superior para as capacidades de análise gráfica em relação às capacidades de análise numérica, que estão relacionadas a extrair índices numéricos compostos como o SRL. Esta maior importância da análise gráfica para expressar a maturidade de integração do sistema por meio da escala IRL está de acordo com algumas sugestões existentes na literatura, como é a sugestão de Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) de que a visualização concisa e completa da maturidade das partes de um sistema pode fornecer uma compreensão da maturidade geral do sistema ao invés de um único índice composto.

Finalmente, por meio do estudo de caso e dos resultados de avaliação aqui descritos, é possível confirmar a hipótese estabelecida de que poderia ser útil aplicar a escala IRL a partir de diferentes visões de arquitetura de sistemas, e é possível validar a utilidade e eficácia dos artefatos propostos para o estudo de caso realizado e grupo de profissionais entrevistado.

Como limitações desta pesquisa, o autor aponta que: o estudo de caso realizado foi favorável à aplicação do método proposto, e outros estudos de caso podem ser realizados no futuro com diferentes tipos de sistemas para enriquecer a análise do método proposto; embora os profissionais entrevistados possuam bastante tempo de experiência profissional, eles ainda não tinham experiência de utilização da escala IRL, o que pode levar a avaliações menos maduras em relação à prática da escala IRL.

Em relação à generalização para uma classe de problemas, o autor sugere que o método proposto poderia ser aplicado a fim de realizar a avaliação da maturidade de integração por meio da escala IRL (AUSTIN; YORK, 2015, 2016; ISRACOI, 2017) em sistemas complexos (HOBDAY, 1998) onde seja útil a utilização de visões de arquitetura (MAIER; RECHTIN, 2000), sob as condições descritas no método proposto. Esta utilidade poderia ser de maneira a auxiliar a organizar a análise do sistema por meio de visões de arquitetura, ou de maneira a utilizar matrizes que incorporem informações sobre os tipos de interações entre os elementos do sistema e que separem os diferentes tipos de interações entre mesmos elementos do sistema a fim de estabelecer diferentes níveis da escala IRL.

O estudo de caso foi realizado com um sistema espacial, porém diversos outros tipos de sistemas complexos (HOBDAY, 1998) poderiam utilizar o método proposto já que a heurística de visões de arquitetura é aplicável a distintos tipos de sistemas complexos (MAIER; RECHTIN, 2000). O autor propõe que futuras pesquisas poderiam auxiliar a consolidar e refinar este método proposto.

5.4.3. Explicitação de aprendizagens

Esta seção é dedicada a explicitar as aprendizagens do autor em relação à aplicação da metodologia *Design Science*.

O planejamento inicial da pesquisa previa a metodologia de estudo de caso, e o método proposto contemplaria apenas a matriz DMM. Durante a realização da banca de avaliação da proposta de dissertação foi proposto que o autor buscase interagir com profissionais da equipe de desenvolvimento dos satélites, a fim de explorar como a escala IRL poderia se relacionar com suas atividades no projeto, já que a escala ainda não é sistematicamente utilizada em projetos do INPE. Após primeiras interações com a equipe de desenvolvimento para apresentar o projeto de pesquisa e após ter tido boa recepção por parte da equipe, foi decidido reformular o planejamento da pesquisa para utilizar a metodologia *Design Science* e seus métodos de avaliação, e validação, de teorias.

A utilização destes métodos de avaliação (TREMBLAY; HEVNER; BERNDT, 2010; DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015) foi fundamental para a pesquisa, principalmente a utilização da metodologia de grupos focais (TREMBLAY; HEVNER; BERNDT, 2010) que inspirou o autor a melhor explorar as interações com a equipe de desenvolvimento, para refinar a própria pesquisa, e também para moldar o roteiro do estudo de caso e o conteúdo da apresentação que seria preparada em vista das questões que seriam avaliadas pelos entrevistados.

Uma importante contribuição dos entrevistados para refinar a pesquisa foi que, durante interações iniciais com os entrevistados de identificação ID 12 e 3, identificados na Tabela B.1, estes questionaram o fato de que ao não utilizar a matriz DSM poderia se perder uma parte rica de informações, e que algo como a utilização de cores na matriz poderia ser utilizado. Após estas interações, o autor buscou na literatura de aplicação da matriz DSM (EPPINGER; BROWNING, 2012; BROWNING, 2016) o que poderia ser explorado para esta questão e passou a considerar a incorporação da matriz DSM na pesquisa.

A parte da pesquisa que havia sido realizada até o exame de proposta de dissertação foi então reformulada de acordo com os passos e critérios definidos pela metodologia *Design Science*, mais especificamente o roteiro de pesquisa proposto (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JUNIOR, 2015, cap. 5). Este roteiro foi de grande valor para a condução da pesquisa. Por exemplo, ao se definir a funcionalidade e características esperadas para os artefatos, como realizado na seção 5.1, o desenvolvimento e avaliação do artefato se tornaram muito mais objetivos ao utilizar estes parâmetros. Não só a avaliação do método proposto foi baseado neste método, mas também a avaliação da escala IRL também se baseou neste método utilizando os critérios em que a escala IRL estão baseados.

Assim, esta pesquisa teve um grande benefício com a interação com os grupos focais de avaliação e utilização da metodologia *Design Science*.

6 CONCLUSÃO

Concluindo esta dissertação, dois principais resultados desta pesquisa serão destacados a seguir.

O primeiro resultado a ser destacado é sobre o uso da escala IRL como apoio ao desenvolvimento de satélites. Em relação à aplicação da escala IRL como apoio à análise de arquitetura do sistema, foram identificadas possibilidades nas atividades de análise técnica, de estudos de risco e de criação do plano de desenvolvimento e verificação de satélites. Em relação à aplicação da escala IRL no acompanhamento da evolução da integração do sistema, foram identificadas possibilidades nas atividades de apoio à tomada de decisão, como o nível de cobrança a ser exigida pela função de garantia do produto, alertas para as funções de arquitetos de sistema e verificação, e avaliação da maturidade da infraestrutura de testes de satélites. Os resultados também destacaram a importância da escala IRL como uma ferramenta de comunicação gerencial, e o interesse na identificação dos requisitos ou níveis de maturidade desejados para cada uma das fases do desenvolvimento de satélites, e para pontos críticos de tomada de decisão como o início das atividades de montagem, integração e testes (AIT). Já para apoio à função de dependabilidade a escala IRL não foi considerada relevante.

Ainda em relação à escala IRL, por meio do estudo de caso e avaliação, foi possível mostrar a complementariedade da escala IRL em relação à escala TRL, e validar a utilidade e eficácia da escala IRL para o grupo de profissionais entrevistados. O autor organizou considerações para a escala IRL em relação ao impacto de mudanças no sistema, já que estas ainda não são expressas na literatura. O estudo de caso contemplou a análise da integração com segmentos externos ao satélite, e não somente entre seus subsistemas. O estudo de caso também pôde mostrar como a escala IRL representa diferentes filosofias de desenvolvimento e testes, ao comparar dois satélites com diferentes filosofias.

O segundo resultado a ser destacado é o desenvolvimento do método proposto para avaliação da maturidade de integração entre elementos tecnológicos a partir de visões de arquitetura. O método proposto utiliza o conceito de visões de arquitetura, que é útil como elemento organizador da análise da arquitetura de sistemas e é cada vez mais comum em sistemas complexos centrados em informação, sendo que esta utilidade foi demonstrada pelo estudo de caso e validada pelos profissionais entrevistados. O autor utilizou visões de arquitetura existentes nos sistemas do estudo de caso, e também propôs novas visões de arquitetura para enriquecer a análise dos sistemas e do estudo de caso.

O método proposto abrange dois artefatos complementares, que são matrizes do tipo DSM e DMM para incorporarem as informações de visões de arquitetura e avaliação da escala IRL. A matriz DMM propicia maior enfoque na organização da arquitetura do sistema por meio de suas visões de arquitetura, podendo contribuir para a visão holística da integração das partes ao todo esperado e para melhor compreender as relações de progressão do *design* do sistema. A matriz DMM poderia ser mais propícia de ser utilizada ao realizar aplicações de apoio à análise de arquitetura do sistema, onde o maior enfoque na organização do sistema e maior nível de abstração das visões de arquitetura sejam mais adequados. Por outro lado, seria importante que a matriz DSM fosse utilizada na aplicação de acompanhamento da integração do sistema, por ser uma ferramenta de comunicação a diversas partes interessadas. A utilidade e eficácia de ambos os artefatos foram demonstradas no estudo de caso e validadas pelos entrevistados.

Nesta dissertação, o autor também realizou considerações sobre a relação da escala IRL com normas internacionais de interesse, que apoiaram a aplicação da escala IRL nesta pesquisa e poderão apoiar outros praticantes da escala IRL. Uma das considerações é a proposta de quais tipos de documentos poderiam servir como evidências para avaliação da escala IRL, elaborado a partir de normas internacionais, já que 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. Outra

consideração realizada é a relação da escala IRL com o ciclo de vida de sistemas espaciais segundo o padrão ECSS.

O autor propôs que futuras pesquisas pudessem: ajudar a consolidar ou refinar as considerações sobre impactos de mudanças na escala IRL; explorar indicadores complementares à escala IRL para representar o grau de dificuldade em avançar entre níveis; explorar como a escala IRL poderia representar a verificação por análise; explorar como a escala IRL poderia auxiliar na identificação e controle de itens críticos; e a consolidar e refinar o método proposto nesta dissertação para utilização de visões de arquitetura.

Esta dissertação contribui para o avanço do conhecimento na literatura da escala IRL por meio do método proposto, do estudo de caso realizado, das avaliações realizadas e validações práticas por parte de profissionais que são público-alvo para utilização da escala IRL. A dissertação contribui também para o avanço do conhecimento no INPE em relação à utilização da escala IRL, e sua relação com as atividades realizadas no desenvolvimento de satélites do INPE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAO, Y. **QFD: Quality Function Deployment: integrating customer requirements into product design**. Portland, USA: Productivity, 1990.
- ARMSTRONG JUNIOR, J. E. Issue formulation. In: SAGE, A. P.; ROUSE, W. B. (Eds.). **Handbook of systems engineering and management**. 2.ed. Hoboken, USA: Wiley, 2009. p. 1027–1089.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **ABNT NBR ISO 9000: sistemas de gestão da qualidade: fundamentos e vocabulário**. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **ABNT NBR ISO 16290:2015: sistemas espaciais: definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação**. Rio de Janeiro, 2015.
- ATWATER, B.; UZDZINSKI, J. Wholistic sustainment maturity: the extension of system readiness methodology across all phases of the lifecycle of a complex system. **Procedia Computer Science**, v. 28, p. 601–609, 2014.
- AUSTIN, M. F.; YORK, D. M. System Readiness Assessment (SRA) an illustrative example. **Procedia Computer Science**, v. 44, p. 486–496, 2015.
- _____. System Readiness Assessment (SRA) a vade mecum. In: AUVRAY, G. et al. (Eds.). **Complex systems design & management: Proceedings of the sixth International Conference on Complex Systems Design & Management, CSD&M 2015**. Cham, Switzerland: Springer, 2016. p. 53–68.
- BAIOCCO, P. et al. System driven technology selection for future European launch systems. **Acta Astronautica**, v. 107, p. 301–316, 2015.
- BILBRO, J. **Technology assessment calculator**. JB Consulting International, 2009. Disponível em:
<http://www.jbconsultinginternational.com/Pages/IntegratedTRL_AD2Calculator.s.aspx>.
- BLANCHARD, B. S.; FABRYCKY, W. J. **Systems engineering and analysis**. 4.ed. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, 2006.
- BROWNING, T. R. Design structure matrix extensions and innovations: a survey and new opportunities. **IEEE Transaction on Engineering Management**, v. 63, n. 1, p. 27–52, 2016.
- BUEDE, D. M. **The engineering design of systems: models and methods**. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000.

CARVALHO, M. M.; RABECHINI JUNIOR, R. **Fundamentos em gestão de projetos: construindo competências para gerenciar projetos**. 3.ed. São Paulo, Brasil: Atlas, 2011.

CHAGAS JUNIOR, M. F.; LEITE, D. E. S.; JESUS, G. T. "Coupled processes" as dynamic capabilities in systems integration. **RAE-Revista de Administração de Empresas**, v. 57, n. 3, p. 245–257, 2017.

CORNFORD, S. L.; SARFIELD, L. Quantitative methods for maturing and infusing advanced spacecraft technology. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE PROCEEDINGS, 2004. **Proceedings...** IEEE, 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1367652/>>.

CRAWLEY, E. et al. The influence of architecture in engineering systems. In: MIT ENGINEERING SYSTEMS SYMPOSIUM, 2004, Cambridge, USA. **Proceedings...** Cambridge, USA: MIT, 2004. Disponível em: <strategic.mit.edu/docs/architecture-b.pdf>.

CRAWLEY, E.; CAMERON, B.; SELVA, D. **System architecture: strategy and product development for complex systems**. Harlow, UK: Pearson, 2016.

DANILOVIC, M.; BROWNING, T. R. Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. **International Journal of Project Management**, v. 25, n. 3, p. 300–314, 2007.

DEPARTMENT OF DEFENSE - DOD. **Technology Readiness Assessment (TRA) guidance: Assitant Secretary of Defense for Research and Engineering**. Washington, USA: DoD, 2011. Disponível em: <<http://www.acq.osd.mil/chieftechnologist/publications/docs/TRA2011.pdf>>.

_____. **Systems engineering: Defense Acquisition Guidebook (DAG)**. 2017. Disponível em: <<http://www.acq.osd.mil/se/pg/guidance.html>>.

DEPARTMENT OF ENERGY - DOE. **Technology readiness assessment guide**. Washington, USA: DOE, 2015. Disponível em: <<https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04-admchg1>>.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2015.

EISNER, H. **Managing complex systems: thinking outside the box**. Washington, USA: John Wiley & Sons, 2005.

_____. **Essentials of project and systems engineering management**. 3.ed. Washington, USA: John Wiley & Sons, 2008.

EPPINGER, S. D. A planning method for integration of large-scale engineering systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 1997, Tampere, Finland. **Proceedings...** Tampere, Finland, 1997.

EPPINGER, S. D.; BROWNING, T. R. **Design structure matrix methods and applications**. Cambridge, USA: MIT Press, 2012.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION - ECSS. **ECSS-Q-ST-10-04C**: critical-item control. Noordwijk, The Netherlands, 2008.

_____. **ECSS-M-ST-10C Rev.1**: project planning and implementation. Noordwijk, The Netherlands, 2009a.

_____. **ECSS-E-ST-10-02C**: verification. Noordwijk, The Netherlands, 2009b.

_____. **ECSS-E-HB-10-02A**: verification guidelines. Noordwijk, The Netherlands, 2010.

_____. **ECSS-E-ST-10-03C**: testing. Noordwijk, The Netherlands, 2012.

_____. **ECSS-E-ST-10-24C**: interface management. Noordwijk, The Netherlands, 2015.

_____. **ECSS-E-HB-11A**: Technology Readiness Level (TRL) guidelines. Noordwijk, The Netherlands, 2017a.

_____. **ECSS-E-ST-10C Rev.1**: system engineering general requirements. Noordwijk, The Netherlands, 2017b.

_____. **ECSS-Training-L2-E10**: system engineering v6. Noordwijk, The Netherlands, 2017c.

FRERKING, M. A.; BEAUCHAMP, P. M. JPL technology readiness assessment guideline. In: 2016 IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2016. **Proceedings...** IEEE, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7500924/>>.

FUTRON CORPORATION. **FUTRON'S 2014 space competitiveness index: a comparative analysis of how countries invest in and benefit from space industry**. [S.l: s.n.], 2014.

GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE - GAO. **Better management of technology development can improve weapon system outcomes**.

Washington, USA, 1999. Disponível em: <<http://www.gao.gov/products/GAO/NSIAD-99-162>>.

_____. **GAO technology readiness assessment guide: best practices for evaluating the readiness of technology for use in acquisition programs and projects -exposure draft**. 2016. Disponível em: <<http://www.gao.gov/products/GAO-16-410G>>. Acesso em: 23 fev. 2017.

GUERRA, L. **Interfaces module**. Austin, USA: NASA, 2008. Disponível em: <<https://space.se.spacegrant.org/index.php?page=interface-modules>>.

HASTINGS, D. **Space system architecture and design**. Massachusetts Institute of Technology, 2004. Disponível em: <<https://ocw.mit.edu>>.

HASTINGS, D. E.; WEIGEL, A. L.; WALTON, M. A. Incorporating uncertainty into conceptual design of space system architectures. In: INCOSE INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 1., Washington, USA. **Proceedings...** Washington, USA, 2003. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/j.2334-5837.2003.tb02712.x>>.

HEVNER, A. R. et al. Design science in information systems research. **MIS Quarterly: Management Information Systems**, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004.

HOBDAV, M. Product complexity, innovation and industrial organisation. **Research Policy**, v. 26, n. 6, p. 689–710, 1998.

HOBDAV, M.; DAVIES, A.; PRENCIPE, A. Systems integration: a core capability of the modern corporation. **Industrial and Corporate Change**, v. 14, n. 6, p. 1109–1143, 2005.

HUETER, U.; TYSON, R. Ares project technology assessment: approach and tools. In: INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS, 61., 2010. **Proceedings...** 2010. v. 8, p. 6337–6347. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79959479711&partnerID=40&md5=f08088368eda0df0d1a9f62c8d218128>>.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **IEEE 1012-2012 system and software verification and validation**. New York, USA: IEEE, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE;
INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC;
INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO/IEC 26702-2007 IEEE 1220-2005**: standard for systems Engineering: application and management of the systems engineering process. Geneva, Switzerland, 2007.

_____. **ISO/IEC/IEEE 12207-2008**: systems and software engineering: software life cycle processes. Geneva, Switzerland, 2008.

_____. **ISO/IEC/IEEE 42010-2011**: systems and software engineering: architecture description. Geneva, Switzerland, 2011.

_____. **ISO/IEC/IEEE 15288-2015**: systems and software engineering: system life cycle processes. Geneva, Switzerland, 2015.

_____. **ISO/IEC/IEEE 15289-2017: systems and software engineering: content of life-cycle information items (documentation)**. Geneva, Switzerland, 2017.

INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING - INCOSE. **INCOSE systems engineering handbook**. [S.l.]: INCOSE, 2006. v.3.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **Space systems: definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment**. Geneva, Switzerland, 2013.

INTERNATIONAL SYSTEMS READINESS ASSESSMENT COMMUNITY OF INTEREST - ISRACOI. **System Readiness Assessment (SRA) engineering handbook**. ISRACOI, 2017. Disponível em: <<http://www.isracoi.org/Library/Home>>.

JESUS, G. T.; CHAGAS JUNIOR, M. F. Identificação de ferramentas de apoio ao gerenciamento de sistemas espaciais. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 7., 2016, São José dos Campos, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, Brasil: INPE, 2016. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m16d/2016/07.30.22.02>>.

_____. A importância de práticas de verificação e validação no processo de avaliação de métricas de maturidade. In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 8., 2017, São José dos Campos, Brasil. **Anais...** São José dos Campos, Brasil: INPE, 2017. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.22.14.54>>.

_____. Integration readiness levels evaluation and systems architecture: a literature review. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 5, n. 4, p. 73–84, 2018.

JIMENEZ, H.; MAVRIS, D. N. Characterization of technology integration based on technology readiness levels. **Journal of Aircraft**, v. 51, n. 1, p. 291–302, 2014.

KNAGGS, M. et al. Application of systems readiness level methods in advanced fossil energy applications. **Procedia Computer Science**, v. 44, n. C, p. 497–506, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.071>>.

KNAGGS, M. et al. Nesting in the evaluation of system readiness for complex systems of emerging technologies. In: ANNUAL IEEE INTERNATIONAL SYSTEMS CONFERENCE (SysCon), 2017. **Proceedings...** IEEE, abr. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7934811/>>.

KOSSIAKOFF, A. et al. **Systems engineering: principles and practice**. 2.ed. Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 2011.

KUJAWSKI, E. Analysis and critique of the system readiness level. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans**, v. 43, n. 4, p. 979–987, 2013.

LALLI, V. R.; KASTNER, R. E.; HARTT, H. N. **Training manual for elements of interface definition and control**. Cleveland, USA: NASA, 1997. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19970018043>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

LANGFORD, G. O. **Toward a general theory of systems integration: research in the context of systems engineering**. Adelaide, Australia: University of South Australia, 2013. Disponível em: <<http://search.ror.unisa.edu.au/?redirect=http://researchoutputs.unisa.edu.au/11541.2/117212>>.

LARSON, W. J. et al. **Applied space systems engineering**. Hoboken, USA: McGraw-Hill, 2009.

LEMONS, J. C.; CHAGAS JUNIOR, M. F. Application of maturity assessment tools in the innovation process: converting system's emergent properties into technological knowledge. **RAI Revista de Administração e Inovação**, v. 13, n. 2, p. 145–153, 2016.

LINDEMANN, U.; MAURER, M.; BRAUN, T. **Structural complexity management**. Berlin, Germany: Springer, 2009.

LONDON, M. A. et al. Incidence matrix approach for calculating readiness levels. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 23, n. 4, p. 377–403, 2014.

MAGNAYE, R. et al. Earned readiness management for scheduling, monitoring and evaluating the development of complex product systems. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 7, p. 1246–1259, 2014.

MAGNAYE, R. B.; SAUSER, B. J.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E. System development planning using readiness levels in a cost of development minimization model. **Systems Engineering**, v. 13, n. 4, p. 311–323, 2010.

MAIER, M. W.; RECHTIN, E. **The art of systems architecting**. 2.ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 2000.

MANKINS, J. C. **Technology readiness levels: a white paper**. Washington, USA, 1995. Disponível em: <<https://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf>>.

_____. Technology readiness assessments: a retrospective. **Acta Astronautica**, v. 65, n. 9/10, p. 1216–1223, 2009a.

_____. Technology readiness and risk assessments: a new approach. **Acta Astronautica**, v. 65, n. 9/10, p. 1208–1215, 2009b. MANTERE, E. **Utilization of the integration readiness level in operative systems**. Laurea University of Applied Sciences, 2014. Disponível em: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/95769/Mantere_Eeva.pdf?sequence=1>.

MANTERE, E.; PIRINEN, R. Utilization of the integration readiness level in operative systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTIVE COLLABORATIVE LEARNING (ICL), 2014. **Proceedings...** IEEE, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7017860/>>.

MAPAMBA, L. S.; CONRADIE, F. H.; FICK, J. I. J. Technology assessment of plasma arc reforming for greenhouse gas mitigation: a simulation study applied to a coal to liquids process. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 1097–1105, 2016.

MAURER, M.; BRAUN, T.; LINDEMANN, U. Information visualization for the structural complexity management approach. **INCOSE International Symposium**, v. 19, n. 1, p. 939–954, jul. 2009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/j.2334-5837.2009.tb00993.x>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

MCCONKIE, E. et al. Mathematical properties of system readiness levels. **Systems Engineering**, v. 16, n. 4, p. 391–400, 2013.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **NASA systems engineering handbook (SP-2016-6105) rev 2**. Washington, USA: NASA, 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/release-of-revision-to-the-nasa-systems-engineering-handbook-sp-2016-6105-rev-2>>.

NOLTE, W. L.; KENNEDY, B. M.; DZIEGIEL, R. J. J. Technology readiness level calculator. In: NDIA SYSTEMS ENGINEERING CONFERENCE, 2003. **Proceedings...** 2003. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/ndia/2003/systems/nolte2.pdf>>.

OLECHOWSKI, A. L.; EPPINGER, S. D.; JOGLEKAR, N. R. 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 (PICMET), 2015, Portland, USA. **Proceedings...** Portland, USA: IEEE, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7273196/>>.

PETERSON, M. R.; RODBERG, E. H. Spacecraft integration and test. In: PISACANE, V. L. (Ed.). **Fundamentals of space systems**. 2.ed. New York, USA: Oxford University Press, 2005. p. 725–753.

PIMMLER, T. U.; EPPINGER, S. D. Integration analysis of product decompositions. In: ASME CONFERENCE ON DESIGN THEORY AND METHODOLOGY, 1994, Minneapolis, USA. **Proceedings...** Minneapolis, USA: Alfred P. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, 1994. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/2514>>.

PIRINEN, R. Studies of integration readiness levels: case shared maritime situational awareness system. In: IEEE JOINT INTELLIGENCE AND SECURITY INFORMATICS CONFERENCE, 2014, The Hague, Netherlands. **Proceedings...** The Hague, Netherlands: IEEE, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6975575/>>.

PIRINEN, R.; SIVLEN, E.; MANTERE, E. Samples of externally funded research and development projects in higher education: case integration readiness levels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTIVE COLLABORATIVE LEARNING (ICL), 2014, Dubai, United Arab Emirates. **Proceedings...** Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7017855/>>.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK®)**. 5.ed. Newtown Square, USA: PMI, 2013.

RAMAMOORTHY, C. V. et al. Systems integration: problems and approaches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS INTEGRATION, 2., 1992, Morristown, USA. **Proceedings...** Morristown, USA: IEEE, 1992. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/217311/>>.

RECHTIN, E. **Systems architecting of organizations: why eagles can't swim**. Boca Raton, USA: CRC Press, 2000.

RISTINEN, T. **Expert elicitation in technology readiness assessment**. 2010. Espoo, Finland: Aalto University, 2010. Disponível em: <<http://lib.tkk.fi/Dipl/2010/urn100340.pdf>>.

ROSS, A. M. et al. Multi-attribute tradespace exploration as front end for effective space system design. **Journal of Spacecraft and Rockets**, v. 41, n. 1, p. 20–28, 2004.

ROSS, S. Integration readiness assessment tools for streamlining technology development through transition. **Journal of Directed Energy**, 2018. Disponível em: <<http://www.isracoi.org/Library>>.

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

SAGE, A. P.; LYNCH, C. L. Systems integration and architecting: an overview of principles, practices, and perspectives. **Systems Engineering**, v. 1, n. 3, p. 176–227, 1998.

SAUSER, B. J. et al. From TRL to SRL: the concept of systems readiness levels. In: CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING RESEARCH, 2006, Los Angeles, USA. **Proceedings...** Los Angeles, USA, 2006. Disponível em: <<http://www.boardmansauser.com/downloads/2005SauserRamirezVermaGoveCSER.pdf>>.

SAUSER, B. J. et al. A system maturity index for the systems engineering life cycle. **International Journal of Industrial and Systems Engineering**, v. 3, n. 6, p. 673–691, 2008.

SAUSER, B. J. et al. Defining an integration readiness level for defense acquisition. **INCOSE International Symposium**, v. 19, n. 1, p. 352–367, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/j.2334-5837.2009.tb00953.x>>.

SAUSER, B. J. et al. Integration maturity metrics: development of an integration readiness level. **Information Knowledge Systems Management**, v. 9, n. 1, p. 17–46, 2010.

SAUSER, B. J.; MAGNAYE, R. Optimization of system maturity and equivalent system mass for exploration systems development. In: CONFERENCE ON SYSTEMS ENGINEERING RESEARCH, 8., 2010, Hoboken, NJ, USA. **Proceedings...** Hoboken, NJ, USA, 2010. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100001612.pdf>>.

SAUSER, B. J.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E.; TAN, W. A Systems approach to expanding the technology readiness level within defense acquisition. **International Journal of Defense Acquisition Management**, v. 1, p. 39–58, 2008.

SAUSER, B. J.; REILLY, R. R.; SHENHAR, A. J. Why projects fail? how contingency theory can provide new insights: a comparative analysis of NASA's Mars climate orbiter loss. **International Journal of Project Management**, v. 27, n. 7, p. 665–679, 2009.

SCOPUS. **Scopus document search**. Disponível em: <<https://www.scopus.com/>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

SELLERS, J. et al. Redefining space system verification and validation. In: U.S. AIR FORCE T&E DAYS, 1., 2009. **Proceedings...** 2009. Disponível em: <[10.2514/6.2009-1752](http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2009-1752)>.

SHENHAR, A. et al. Toward a NASA-specific project management framework. **Engineering Management Journal**, v. 17, n. 4, p. 9, 2005.

SILLITTO, H. Some really useful principles: a new look at the scope and boundaries of systems engineering. **INCOSE International Symposium**, v. 15, n. 1, p. 911–922, jul. 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/j.2334-5837.2005.tb00719.x>>. Acesso em: 8 jun. 2017.

SIMON, H. A. The science of design: creating the artificial. In: _____. **The sciences of the artificial**. 3.ed. Cambridge, USA: MIT Press, 1996. p. 111–138.

SIVLEN, E.; PIRINEN, R. Utilization of the integration readiness level in the context of industrial system projects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTIVE COLLABORATIVE LEARNING (ICL), 2014, Dubai, United Arab Emirates. **Proceedings...** Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7017856/>>.

TOMASCHEK, K. et al. A survey of technology readiness level users. In: INCOSE INTERNATIONAL SYMPOSIUM1., 2016, Edinburgh, UK. **Proceedings...** Edinburgh, UK, 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/j.2334-5837.2016.00283.x>>.

TREMBLAY, M. C.; HEVNER, A. R.; BERNDT, D. J. The use of focus groups in design science research. In: HEVNER, A.; CHATTERJEE, S. (Eds.). **Design research in information systems: theory and practice**. Boston, USA: Springer, 2010. p. 121–143.

ULRICH, K. The role of product architecture in the manufacturing firm. **Research Policy**, v. 24, n. 3, 1995.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product design and development**. 3.ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2003.

VOSVIEWER. **VOSViewer bibliometric networks**. Disponível em: <<http://www.vosviewer.com/>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

YASSERI, S. Subsea system readiness level assessment. **Underwater Technology**, v. 31, n. 2, p. 77–92, 2013.

_____. A measure of subsea systems' readiness level. **Underwater Technology**, v. 33, n. 4, p. 215–228, 2016.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2.ed. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2001.

ZANDI, I. **Science and engineering in the age of systems**. Pennsylvania: University of Pennsylvania, 1986. Disponível em: <http://www.incose.org/delvalley/Zandi_Paper.pdf>.

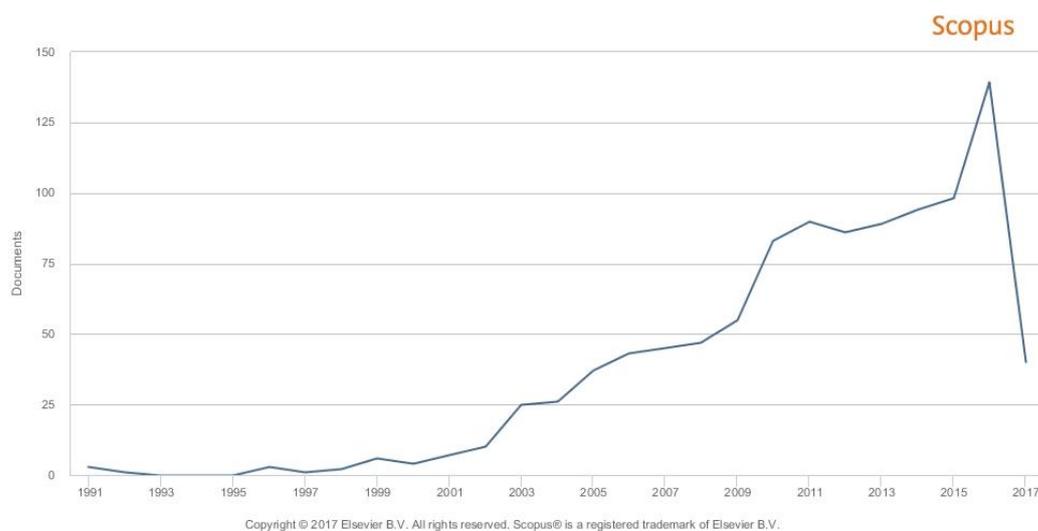
APÊNDICE A – ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A.1. Technology readiness level

A análise bibliométrica de publicações relativas à escala TRL foi realizada através da ferramenta de busca e análise de documentos Scopus (2017) utilizando o termo “*Technology Readiness Level*”, e da ferramenta de análise de redes bibliográficas VOSViewer (2017) que por sua vez utilizou a base de documentos selecionada e exportada pela ferramenta Scopus (2017). A análise foi realizada sobre um total de 1,034 publicações.

A Figura A.1 apresenta a quantidade de publicações a cada ano, representando uma tendência de crescimento de publicações sobre o assunto.

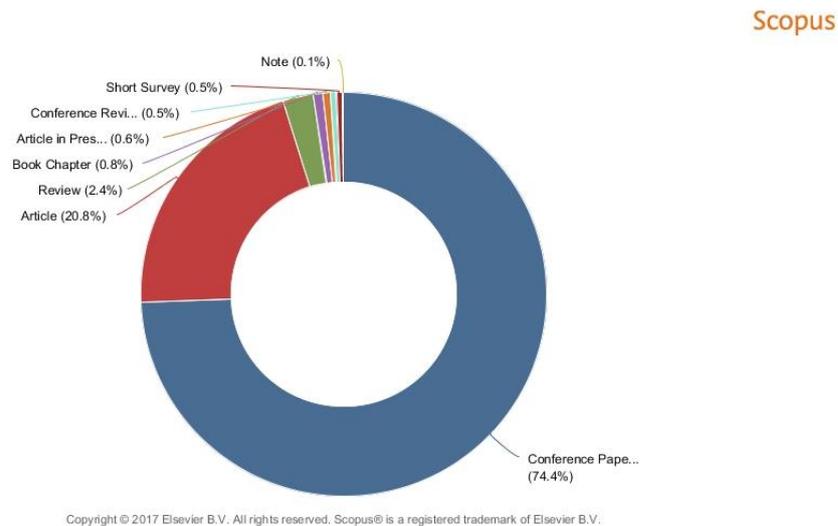
Figura A.1 – Evolução de publicações relativas à escala TRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.2 apresenta os tipos de documentos que foram publicados, representando boa variedade de tipos de publicações com predominância de publicações através de artigos em conferências.

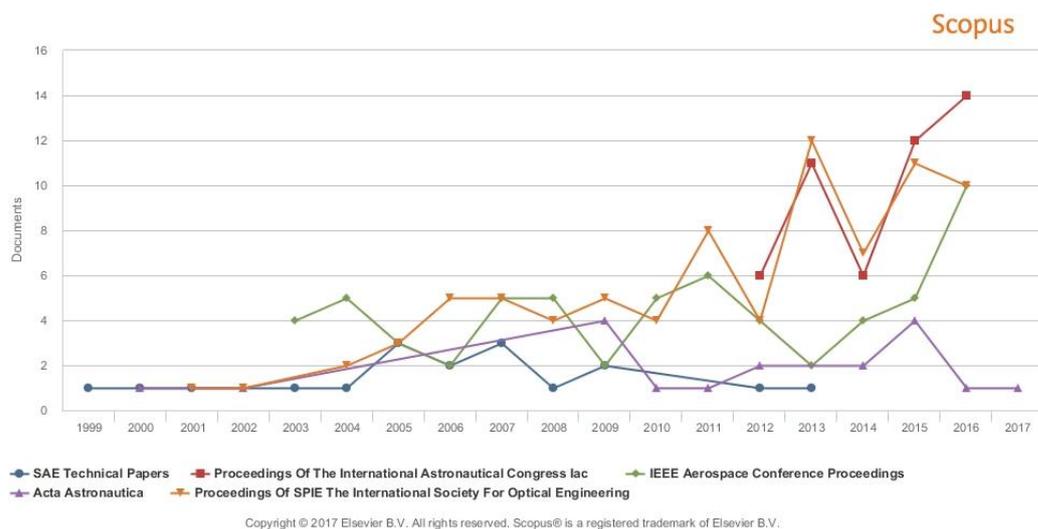
Figura A.2 – Tipos de publicações relativas à escala TRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.3 apresenta os periódicos que tiveram maior número de publicações relacionadas ao assunto. É possível identificar que são periódicos com predominância da área aeroespacial.

Figura A.3 – Periódicos com mais publicações relativas à escala TRL.

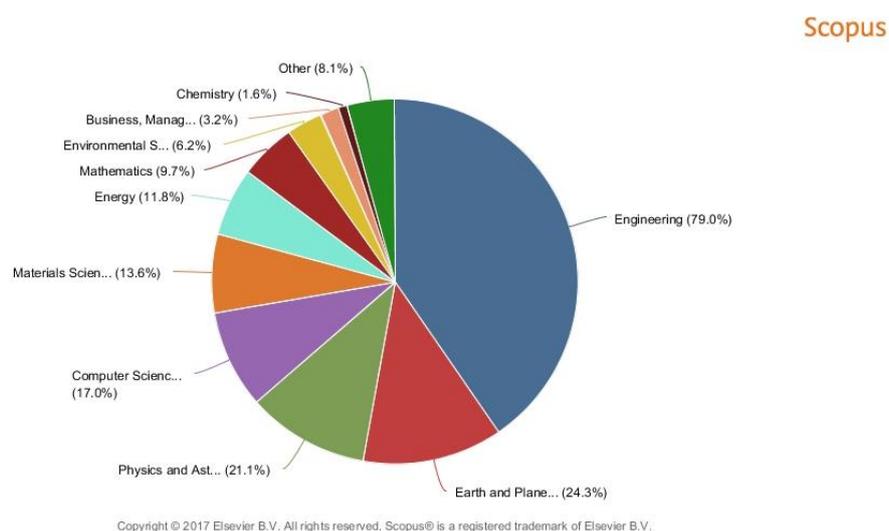


Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.4 apresenta as diferentes disciplinas de classificação das publicações. As publicações são em sua maioria na disciplina de engenharia,

porém também há grande número de publicações nas disciplinas de meio ambiente, física, ciência da computação, ciência dos materiais e energia.

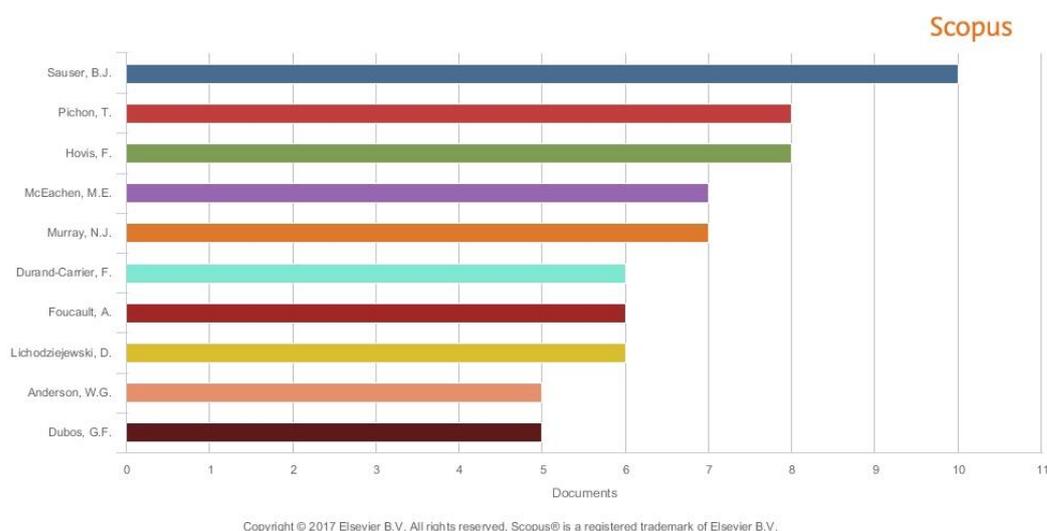
Figura A.4 – Disciplinas de publicações relativas à escala TRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.5 apresenta os principais autores das publicações relativas à escala TRL. Brian J. Sauser é o autor com mais publicações no assunto, e há outros autores com número expressivo de publicações sobre o assunto.

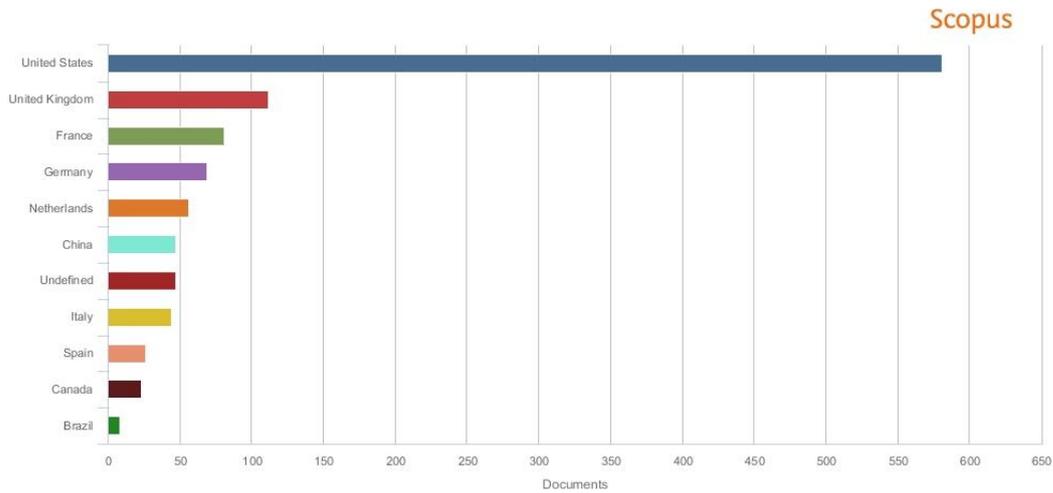
Figura A.5 – Principais autores de publicações relativas à escala TRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.6 apresenta os principais países de origem das publicações relativas à escala TRL. Estados Unidos é o país com mais publicações no assunto.

Figura A.6 – Principais países de origem de publicações relativas à escala TRL.

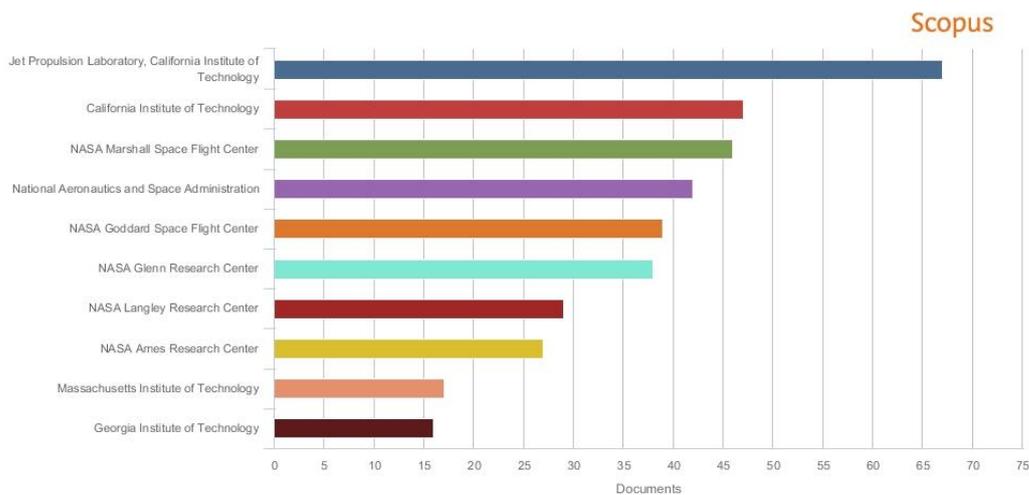


Copyright © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.7 apresenta as principais instituições de origem das publicações relativas à escala TRL. É possível notar a predominância de instituições de pesquisa norte-americanas, principalmente da área aeroespacial.

Figura A.7 – Principais instituições de origem de publicações relativas à escala TRL.



Copyright © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.8 apresenta a rede de citações de publicações relativas à escala TRL. A rede representa a relação de citações entre as publicações que estão na base de dados selecionada, sendo que a base de dados foi extraída da ferramenta Scopus (2017) para o termo “*Technology Readiness Level*”. O tamanho de cada círculo está relacionado ao número de citações, as linhas representam os vínculos de citações entre publicações, a cor representa a data de publicação de acordo com a legenda na Figura A.8, e as publicações estão agrupadas em proximidade com outras publicações com assuntos em comum. Assim é possível identificar as possíveis principais publicações sobre a escala TRL e identificar grupos de publicações com assuntos em comum.

Concluindo, a análise bibliométrica para a escala TRL foi utilizada para identificar os principais autores e publicações que poderiam ser mais relevantes para a pesquisa. As publicações identificadas foram analisadas, e as publicações mais relevantes para o tema da pesquisa foram incluídas na revisão bibliográfica.

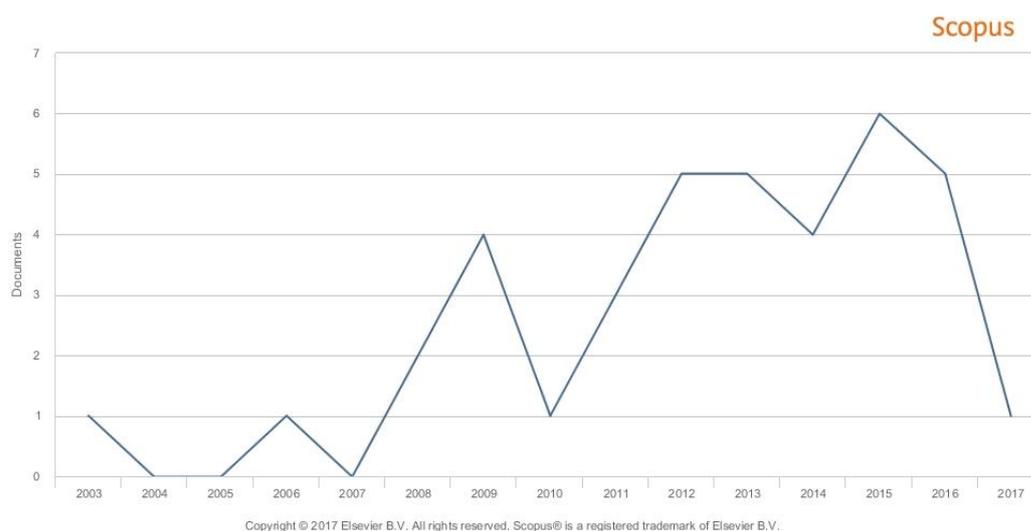
No início da análise bibliométrica houve uma dificuldade de análise devido a que a maioria das publicações utilizam a escala TRL para comunicar a maturidade de sua pesquisa, ao invés de analisar a escala TRL como é parte do tema desta pesquisa. No entanto, a análise de rede de citações da Figura A.8 pôde identificar as publicações que analisam a escala TRL, pois estas publicações aparecem correlacionadas entre si na rede, enquanto que publicações que somente utilizam a escala TRL para publicar seus resultados não tem correlação de citações entre si.

A.2. Integration readiness level

A análise bibliométrica de publicações relativas à escala IRL foi realizada através da ferramenta de busca e análise de documentos Scopus (2017) utilizando o termo “*Integration Readiness Level*”, e da ferramenta de análise de redes bibliográficas VOSViewer (2017) que por sua vez utilizou a base de documentos selecionada e exportada pela ferramenta Scopus (2017). A análise foi realizada sobre um total de 38 publicações.

A Figura A.9 apresenta a quantidade de publicações a cada ano, representando uma tendência de crescimento de publicações sobre o assunto.

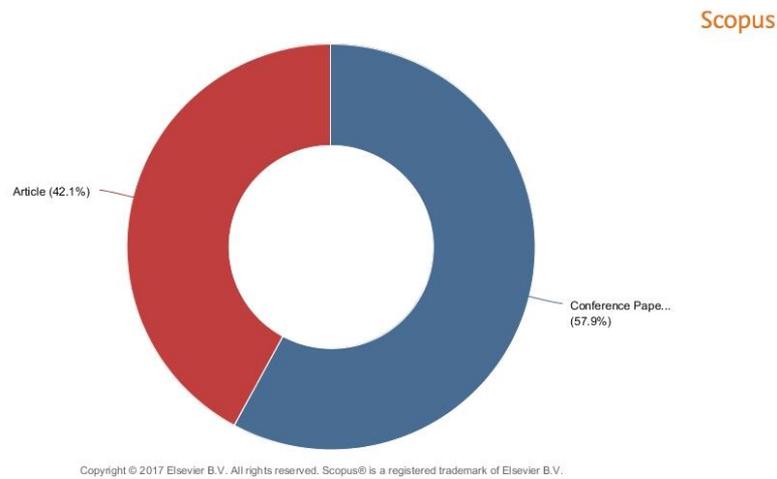
Figura A.9 – Evolução de publicações relativas à escala IRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.10 apresenta os tipos de documentos que foram publicados. É possível identificar que as publicações neste assunto ocorrem através de artigos e conferências, com predominância de publicações através de conferências.

Figura A.10 – Tipos de publicações relativas à escala IRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Tabela A.1 apresenta os periódicos que tiveram publicações relacionadas ao assunto. É possível identificar que são periódicos relativos a engenharia de sistemas, setor aeroespacial e outros setores econômicos.

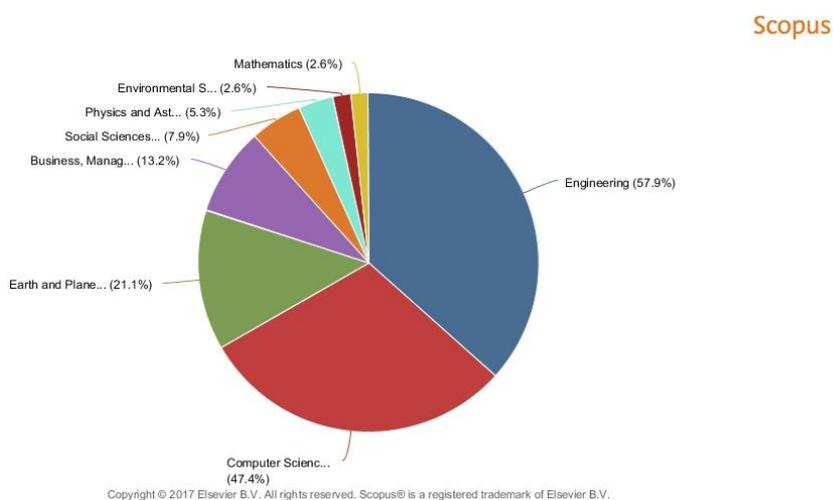
Tabela A.1 – Periódicos com publicações relativas à escala IRL.

Fonte	Total
Systems Engineering	4
IEEE Aerospace Conference Proceedings	3
IEEE Transactions On Engineering Management	2
Underwater Technology	2
Communications In Computer And Information Science	1
IEEE Transactions On Systems Man And Cybernetics Part A Systems And Humans	1
International Journal Of Industrial And Systems Engineering	1
International Journal Of Project Management	1
Journal Of Electrical Engineering And Technology	1
Journal Of Systems Engineering And Electronics	1
Journal Of Systems Science And Systems Engineering	1
Procedia Computer Science	1
Proceedings Of The International Astronautical Congress Iac	1
Xitong Gongcheng Lilun Yu Shijian System Engineering Theory And Practice	1
Yi Qi Yi Biao Xue Bao Chinese Journal Of Scientific Instrument	1

Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.11 apresenta as diferentes disciplinas de classificação das publicações. As publicações são em sua maioria na disciplina de engenharia, porém também há grande número de publicações nas disciplinas de ciência da computação, meio ambiente e gestão.

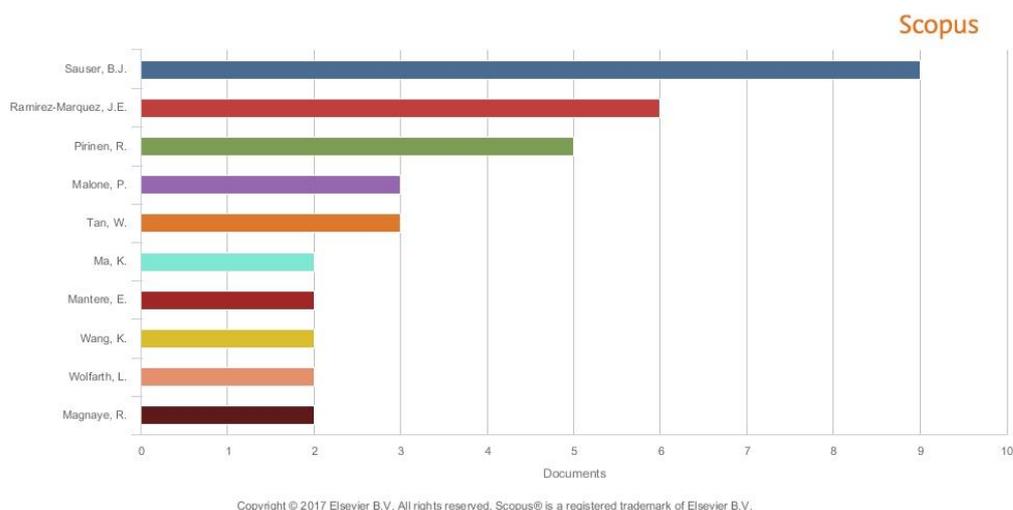
Figura A.11 – Disciplinas de publicações relativas à escala IRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.12 apresenta os principais autores das publicações relativas à escala IRL. Brian J. Sauser é o autor com mais publicações no assunto, e há outros autores com número expressivo de publicações sobre o assunto.

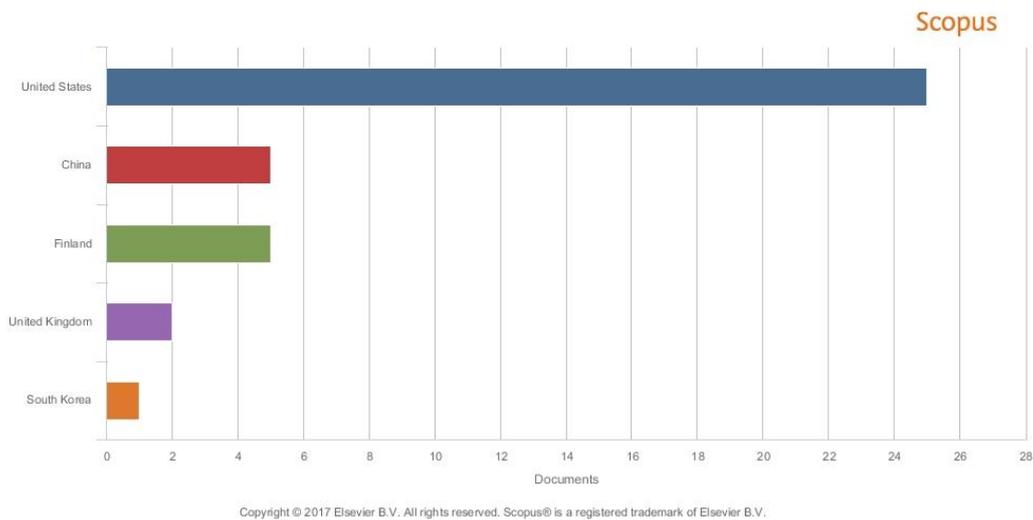
Figura A.12 – Principais autores de publicações relativas à escala IRL.



Fonte: Scopus (2017).

A Figura A.13 apresenta os países de origem das publicações relativas à escala IRL. Estados Unidos é o país com mais publicações no assunto.

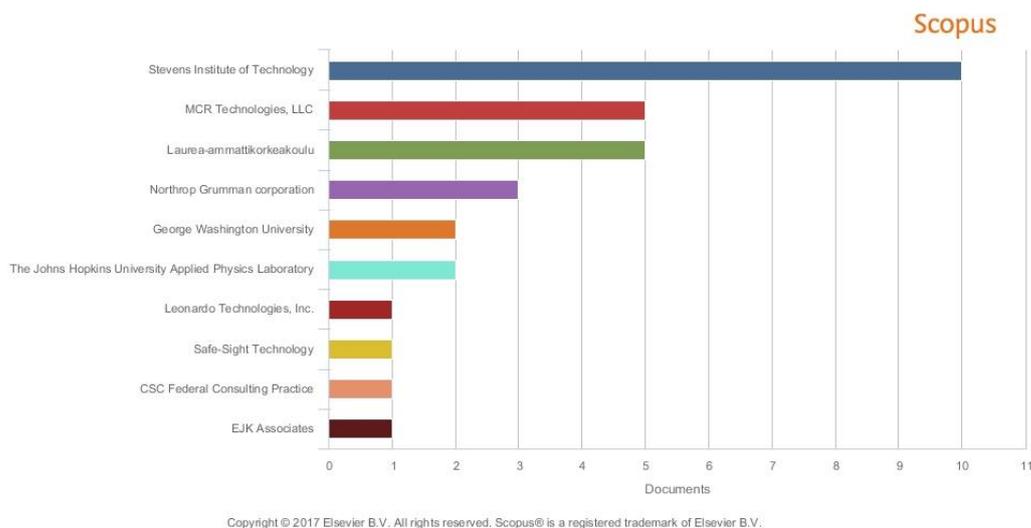
Figura A.13 – País de origem de publicações relativas à escala IRL.



Fonte: Scopus (2017).

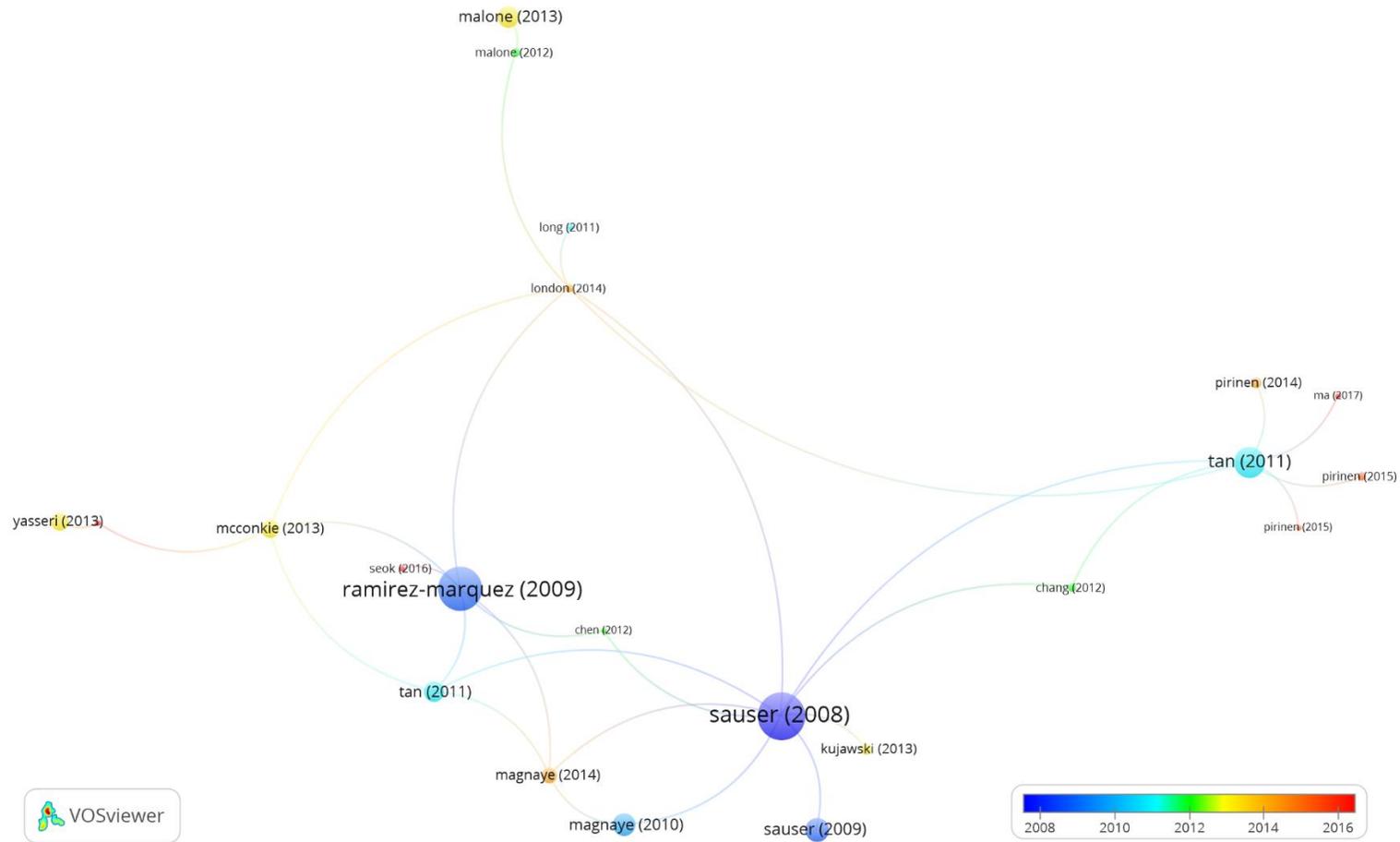
A Figura A.14 apresenta as principais instituições de origem das publicações relativas à escala IRL. É possível notar que há uma variedade interessante de instituições de origem, e a liderança do *Stevens Institute of Technology*.

Figura A.14 – Instituições de origem de publicações relativas à escala IRL.



Fonte: Scopus (2017).

Figura A.15 – Rede de citações de publicações relativas à escala IRL.



Fonte: VOSviewer (2017).

A Figura A.15 apresenta a rede de citações de publicações relativas à escala IRL. A rede representa a relação de citações entre as publicações que estão na base de dados selecionada, sendo que a base de dados foi extraída da ferramenta Scopus (2017) para o termo “*Integration Readiness Level*”. O tamanho de cada círculo está relacionado ao número de citações, as linhas representam os vínculos de citações entre publicações, a cor representa a data de publicação de acordo com a legenda na Figura A.15, e as publicações estão agrupadas em proximidade com outras publicações com assuntos em comum. Assim é possível identificar as possíveis principais publicações sobre a escala IRL e identificar grupos de publicações com assuntos em comum.

A análise bibliométrica para a escala IRL foi utilizada para identificar os principais autores e publicações que poderiam ser mais relevantes para a pesquisa. As publicações identificadas foram analisadas, e as publicações mais relevantes para o tema da pesquisa foram incluídas na revisão bibliográfica.

É possível identificar a liderança do pesquisador Brian J. Sauser e da instituição *Stevens Institute of Technology* nas publicações relativas à escala IRL. Após analisar outros documentos principais sobre a escala IRL, é possível notar ainda que o pesquisador Brian J. Sauser é co-autor em muitas das publicações sobre o assunto. Algumas publicações apresentam críticas à escala IRL e alguns grupos de publicações identificados na Figura A.15 discutem diferentes aspectos da escala IRL.

Após realizar a análise bibliométrica da escala IRL, foi possível perceber que autores, como Brian J. Sauser, e principais publicações sobre a escala IRL tratam da escala IRL. Esta conclusão reforça o entendimento que a escala IRL é um assunto bem discutido como complemento e evolução à escala TRL.

APÊNDICE B – DADOS UTILIZADOS PELA PESQUISA

B.1 Dados dos entrevistados

A Tabela B.1 apresenta os seguintes dados dos profissionais entrevistados: código identificador, nome, função no projeto de desenvolvimento de satélites, grupo focal, data da apresentação e data da entrevista.

Tabela B.1 – Dados dos profissionais entrevistados.

ID	Nome	Função	Grupo Focal	Data da apresentação	Data da entrevista
1	Roberto Alfredo Marino	Arquiteto de sistema	Exploratório	10/04/2018	10/04/2018
2	Rafael Lopes Costa	Arquiteto de sistema	Exploratório	11/04/2018	11/04/2018
3	Renato Oliveira de Magalhães	Arquiteto de sistema	Exploratório	12/04/2018	12/04/2018
4	José Dias de Matos	Arquiteto de sistema	Exploratório	13/04/2018	13/04/2018
5	Carlos Alberto Bento Gonçalves	Arquiteto de sistema	Exploratório	17/04/2018	17/04/2018
6	Walter Abrahão dos Santos	Arquiteto de sistema	Exploratório	27/04/2018	27/04/2018
7	Ana Paula de Sá Santos Rabello	Dependabilidade	Confirmatório	19/04/2018	19/04/2018
8	Lucas Lopes Costa	Dependabilidade	Confirmatório	19/04/2018	19/04/2018
9	Gledson Hernandez Diniz	Garantia do produto	Confirmatório	20/04/2018	20/04/2018
10	Adalberto Coelho da Silva Junior	Verificação	Confirmatório	23/04/2018	23/04/2018
11	Adenilson Roberto da Silva	Análise de missão	Confirmatório	27/04/2018	04/05/2018
12	Luiz Antonio dos Reis Bueno	Engenharia de sistemas	Confirmatório	03/05/2018	03/05/2018
13	Antonio Carlos de Oliveira Pereira Junior	Gestão do programa CBERS	Confirmatório	10/05/2018	-
14	Mauricio Gonçalves Vieira Ferreira	Segmento de controle do INPE	(Coleta de dados)	23/04/2018	-
15	Jun Tominaga	Segmento de controle do INPE	(Coleta de dados)	24/04/2018	-
16	João Viane Soares	Segmento de aplicações do INPE	(Coleta de dados)	02/05/2018	-

Fonte: Produção do autor.

B.2 Apresentação utilizada

A Figura B.1 ilustra a apresentação utilizada, porém com os dados do estudo de caso modificados a fim de preservar sua confidencialidade.

Figura B.1 – Ilustração da apresentação utilizada na etapa de avaliação.

Avaliação da maturidade de integração a partir de visões de arquitetura de sistemas espaciais

Gabriel T. Jesus
Dr. Milton F. Chagas Jr.

Technology Readiness Levels (TRL)

- TRL 9 > Sistema real comprovado em voo
- TRL 8 > Sistema real concluído e aceito para voo
- TRL 7 > Modelo demonstrando desempenho
- TRL 6 > Modelo demonstrando funções críticas
- TRL 5 > Verificação funções críticas
- TRL 4 > Verificação funcional
- TRL 3 > Prova de conceito analítica
- TRL 2 > Conceito formulado
- TRL 1 > Princípios básicos

Adaptado de Mankins (2009) e norma ABNT NBR ISO 16290 (2015)

TRL e mudanças no sistema

	Regras	Impacto no TRL
NASA	Se a arquitetura, configuração ou o ambiente mudaram	TRL 6
	Se ambiente e arquitetura são suficientemente próximas da versão anterior	TRL 7
	Mudanças no <i>design</i> .	(nova avaliação TRL)
ECSS	A - OTS sem modificações.	-
	B - OTS sem modificações, mas não considerado como qualificado para a missão.	TRL 6
	C - OTS com modificações em seu <i>design</i> .	TRL 4 a 6 conforme o caso.
	D - Produto em desenvolvimento ou recém desenvolvido.	TRL < 6 se função crítica foi impactada. Nova avaliação deve ser realizada.

Adaptado de NASA (2017) e ECSS (2017)

SAT1 em T0

Subs.	Categoria V&V*	TRL	Justificativa
SS01	B	3	Mudança no design.
SS02	A	3	Mudança no design.
SS03	A	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS04	B	6	Categoria B para elementos do Subistema.
SS05	B	6	Categoria B para elementos do Subistema.
SS06	B	6	Categoria B para elementos do Subistema.
SS07	A	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS08	-	4-6	Em desenvolvimento, ainda não qualificado.
SS09	-	6	Herança de outros satélites.
SS10	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS11	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS12	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS13	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.
SS14	-	7	Ambiente/arquitetura próximas da versão anterior.

*Baseado em documento do projeto.

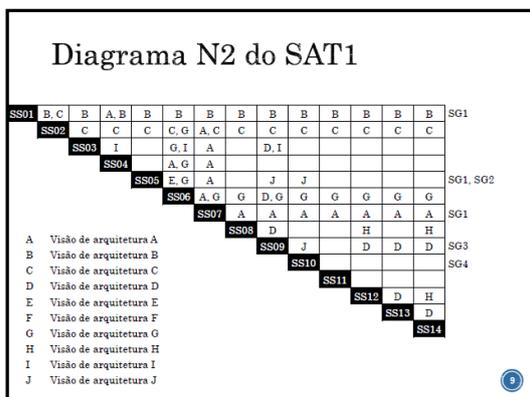
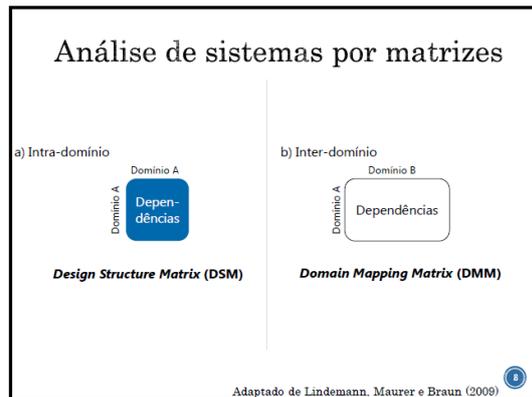
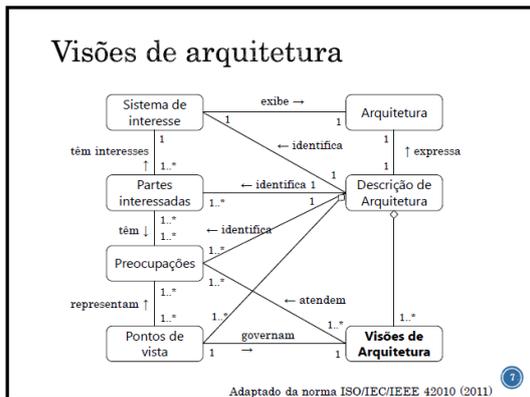
(continua)

Figura B.1 – Continuação.



SAT1 em T1 (DSM trad.)

	SS01	SS02	SS03	SS04	SS05	SS06	SS07	SS08	SS09	SS10	SS11	SS12	SS13	SS14	SG1	SG2	SG3	SG4
SS01	9	3	6	3	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	0	0
SS02	3	9	6	6	6	6	3	3	3	6	6	6	6	6	0	3	0	0
SS03	6	6	9	7	0	6	6	0	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0
SS04	3	6	7	9	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
SS05	7	6	0	0	9	6	6	0	5	6	0	0	0	0	6	3	0	0
SS06	7	6	6	6	6	9	6	5	5	6	6	6	6	6	0	3	3	0
SS07	6	3	6	6	6	6	9	5	5	6	6	6	6	6	7	3	0	0
SS08	6	3	0	0	0	5	5	9	5	0	0	3	0	5	0	3	3	0
SS09	6	3	5	0	5	5	5	5	9	5	0	5	5	5	0	3	5	0
SS10	6	6	0	0	6	6	6	0	5	9	0	0	0	0	0	3	0	6
SS11	6	6	0	0	0	6	6	0	0	0	9	0	0	0	0	3	0	0
SS12	6	6	0	0	0	6	6	3	5	0	0	9	7	7	0	3	5	0
SS13	6	6	0	0	0	6	6	0	5	0	0	7	9	7	0	3	0	0
SS14	6	6	0	0	0	6	6	3	5	0	0	7	7	9	0	3	5	0
SG1	6	0	0	0	6	0	7	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0
SG2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	9	6	9
SG3	0	0	0	0	0	3	0	5	0	0	5	0	5	0	5	6	9	0
SG4	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	9	0	9



Matriz DSM do SAT1

	SS01	SS02	SS03	SS04	SS05	SS06	SS07	SS08	SS09	SS10	SS11	SS12	SS13	SS14	SG1	SG2	SG3	SG4
SS01	-	B,C	B	A,B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B				
SS02	B,C	-	C	C	C	C,G	A,C	C	C	C	C	C	C	C				
SS03	B	C	-	I	-	G,I	A	-	D,I	-	-	-	-	-				
SS04	A,B	C	I	-	-	A,G	A	-	-	-	-	-	-	-				
SS05	B	C	-	-	-	E,G	A	-	J	J	-	-	-	-	E	E	-	-
SS06	B	C,G	G,I	A,G	E,G	-	A,G	G	D,G	G	G	G	G	G	-	G	G	-
SS07	B	A,C	A	A	A	A,G	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
SS08	B	C	-	-	-	-	G	A	-	D	-	H	H	H	-	-	-	-
SS09	B	C	D,I	-	J	D,G	A	D	-	J	-	D	D	D	-	-	D	-
SS10	B	C	-	-	-	J	G	A	-	J	-	-	-	-	-	-	-	F
SS11	B	C	-	-	-	-	G	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SS12	B	C	-	-	-	-	G	A	H	D	-	-	D	H	-	-	-	-
SS13	B	C	-	-	-	-	G	A	-	D	-	D	-	D	-	-	-	-
SS14	B	C	-	-	-	-	G	A	H	D	-	H	D	-	-	-	-	-
SG1	B	-	-	-	-	F	G	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SG2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SG3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SG4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Analísado posteriormente

(continua)

Figura B.1 – Continuação.

Matriz DMM do SAT1

	VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I	VA-J
SS01	A	B	C	-	-	-	-	-	-	-
SS02	A	B	C	-	-	-	G	-	-	-
SS03	A	B	C	D	-	-	G	-	I	-
SS04	A	B	C	-	-	-	G	-	I	-
SS05	A	B	C	-	E	-	G	-	-	J
SS06	A	B	C	D	E	-	G	-	I	-
SS07	A	B	C	-	-	-	G	-	-	-
SS08	A	B	C	D	-	-	G	H	-	-
SS09	A	B	C	D	-	-	G	-	I	J
SS10	A	B	C	-	-	F	G	-	-	-
SS11	A	B	C	-	-	-	G	-	-	-
SS12	A	B	C	D	-	-	G	H	-	-
SS13	A	B	C	D	-	-	G	-	-	-
SS14	A	B	C	D	-	-	G	H	-	-
SG1	A	B	-	-	E	-	-	-	-	-
SG2	-	-	-	-	E	-	G	-	-	-
SG3	-	-	-	D	-	-	G	-	-	-
SG4	-	-	-	-	-	F	-	-	-	-

IRL e mudanças no sistema

- Considerações para este exercício:

Regras consideradas	Impacto no IRL
Mudanças na arquitetura, configuração ou ambiente.	IRL 6
Ambiente e arquitetura são suficientemente próximas da anterior.	IRL 7
Funcionalidades de integração permanecem, ainda não foram testadas em conjunto, mas foram testadas nas partes em separado.	IRL 5
Mudanças nas funcionalidades de integração, ainda não testadas.	IRL 3

SAT1 em T0

	VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I	VA-J
SS01	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-
SS02	3	3	3	-	-	-	6	-	-	-
SS03	6	6	6	5	-	-	6	-	5	-
SS04	6	7	6	-	-	-	6	-	7	-
SS05	6	7	6	-	6	-	6	-	-	5
SS06	6	7	6	5	7	-	6	-	7	-
SS07	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
SS08	5	3	3	5	-	-	5	3	-	-
SS09	5	3	3	5	-	-	5	-	5	5
SS10	6	6	6	-	-	6	6	-	-	5
SS11	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
SS12	6	6	6	5	-	-	6	5	-	-
SS13	6	6	6	5	-	-	6	-	-	-
SS14	6	6	6	5	-	-	6	5	-	-
SG1	7	6	-	-	6	-	-	-	-	-
SG2	-	-	-	-	6	-	3	-	-	-
SG3	-	-	-	5	-	-	3	-	-	-
SG4	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-

SAT1 em T1

	VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I	VA-J
SS01	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-
SS02	3	3	3	-	-	-	6	-	-	-
SS03	6	6	6	5	-	-	6	-	5	-
SS04	6	7	6	-	-	-	6	-	7	-
SS05	6	7	6	-	6	-	6	-	-	6
SS06	6	7	6	5	7	-	6	-	7	-
SS07	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
SS08	5	3	3	5	-	-	5	3	-	-
SS09	5	3	3	5	-	-	5	-	5	6
SS10	6	6	6	-	-	6	6	-	-	6
SS11	6	6	6	-	-	-	6	-	-	-
SS12	6	6	6	5	-	-	6	5	-	-
SS13	6	6	6	5	-	-	6	-	-	-
SS14	6	6	6	5	-	-	6	5	-	-
SG1	7	6	-	-	6	-	-	-	-	-
SG2	-	-	-	-	6	-	3	-	-	-
SG3	-	-	-	5	-	-	3	-	-	-
SG4	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-

SAT2 em T2

	VA-A	VA-B	VA-C	VA-D	VA-E	VA-F	VA-G	VA-H	VA-I
SS01	6	6	6	-	-	-	-	-	-
SS02	6	6	6	-	6	-	6	6	-
SS03	6	6	6	-	-	-	6	6	-
SS04	6	6	6	-	-	-	6	6	-
SS05	6	6	6	-	6	-	6	6	-
SS06	6	6	6	-	6	-	6	6	-
SS07	6	6	6	-	-	-	6	6	-
SS08	6	6	6	6	6	-	6	-	6
SS09	6	6	6	6	-	-	6	-	6
SS10	6	6	6	6	-	-	6	-	-
SS11	6	6	6	6	-	6	-	-	-
SS12	6	6	6	-	-	6	-	-	-
SS13	6	6	6	-	-	6	-	-	-
SS14	6	6	6	6	6	-	6	-	6
SS15	6	6	6	6	6	-	6	-	-
SS16	6	6	6	6	6	-	6	-	6

• Evolução da maturidade através de testes nos subsistemas (IRL 5) e em nível de sistema (IRL 6) com os modelos utilizados:

Segmento 2 após testes

	VA-K	VA-L	VA-M
SS01	8	8	-
SS02	8	8	-
SS03	8	8	-
SS04	8	8	-
SS05	8	8	-
SS06	8	8	-
SS07	8	8	-
SS08	8	8	3
SS09	8	8	3
SS10	8	8	9
SS11	8	8	9
SS12	8	8	5
SS13	8	8	5
SS14	8	8	5
SG1	-	-	-
SG2	8	8	5
SG3	-	-	5
SG4	9	-	9

(continua)

Figura B.1 – Conclusão.

Segmento 3 após testes

	VA-N	VA-O
SS01	-	-
SS02	-	-
SS03	-	-
SS04	-	-
SS05	-	-
SS06	-	-
SS07	-	-
SS08	-	6
SS09	5	-
SS10	-	-
SS11	-	-
SS12	-	6
SS13	-	-
SS14	-	6
SG1	-	-
SG2	-	-
SG3	5	6
SG4	-	-

SAT1 em T1 (DSM)

	SS01	SS02	SS03	SS04	SS05	SS06	SS07	SS08	SS09	SS10	SS11	SS12	SS13	SS14	SG1	SG2	SG3	SG4			
SS01	-	3	3	6	3	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6						
SS02	3	3	-	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6			3				
SS03	6	6	6	-	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6			3				
SS04	7	6	7	7	-	6	6	6	6	6	6	6	6	6			3				
SS05	7	6	7	6	6	-	6	6	6	6	6	6	6	6			3	3			
SS06	7	6	7	6	6	7	6	-	6	6	6	6	6	6			3	3			
SS07	6	6	6	6	6	6	6	6	-	5	5	6	6	6			7	3			
SS08	6	3	5	5	5	5	5	5	5	-	5	5	5	5			3	3			
SS09	6	3	5	5	5	5	5	5	5	5	-	5	5	5			3	5			
SS10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	-	5	5	5			3	6			
SS11	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-	6	6			3				
SS12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-	6			3	5			
SS13	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-			3	5			
SS14	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-		3	5			
SG1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	-					
SG2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	6	9		
SG3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	6	9	
SG4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	6	9

A Visão de Arquitetura A G Visão de Arquitetura G D Visões de Arquitetura D E F J
B Visão de Arquitetura B H Visão de Arquitetura H K Visões de Arquitetura K L M N O
C Visão de Arquitetura C I Visão de Arquitetura I

SAT1 em T1 (DSM trad.)

	SS01	SS02	SS03	SS04	SS05	SS06	SS07	SS08	SS09	SS10	SS11	SS12	SS13	SS14	SG1	SG2	SG3	SG4	
SS01	9	3	6	3	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0	0	0	
SS02	3	9	6	6	6	6	3	3	3	6	6	6	6	6	0	3	0	0	
SS03	6	6	9	7	9	6	6	0	5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	
SS04	3	6	7	9	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
SS05	7	6	0	0	9	6	6	0	5	6	0	0	0	0	0	6	3	0	0
SS06	7	6	6	6	6	9	6	5	5	6	6	6	6	6	0	3	3	0	0
SS07	6	3	6	6	6	6	9	5	5	6	6	6	6	6	7	3	0	0	0
SS08	6	3	0	0	0	5	5	9	5	0	0	3	0	3	0	3	3	0	0
SS09	6	3	5	0	5	5	5	9	5	0	0	5	5	5	0	3	5	0	0
SS10	6	6	0	0	6	6	6	0	5	9	0	0	0	0	0	3	0	0	6
SS11	6	6	0	0	6	6	6	0	0	9	0	0	0	0	0	3	0	0	0
SS12	6	6	0	0	6	6	6	3	5	0	0	9	7	7	0	3	5	0	0
SS13	6	6	0	0	6	6	6	0	5	0	0	7	9	7	0	3	5	0	0
SS14	6	6	0	0	6	6	6	0	5	0	0	7	9	7	0	3	5	0	0
SG1	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
SG2	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SG3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SG4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

System Readiness Levels (SRL)

$$\begin{pmatrix} SRL_1 \\ SRL_2 \\ SRL_3 \\ \dots \\ SRL_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} IRL_{1,1} & IRL_{1,2} & \dots & \dots & IRL_{1,10} \\ IRL_{2,1} & IRL_{2,2} & \dots & \dots & IRL_{2,10} \\ \dots & \dots & IRL_{3,3} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ IRL_{10,1} & IRL_{10,2} & IRL_{10,3} & \dots & IRL_{10,10} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} TRL_1 \\ TRL_2 \\ TRL_3 \\ \dots \\ TRL_{10} \end{pmatrix}$$

Component $SRL_i = \frac{SRL_i}{m_i}$

Composite $SRL = \frac{(SRL_1/m_1) + (SRL_2/m_2) + (SRL_3/m_3) + \dots + (SRL_{10}/m_{10})}{n}$

SAT1 em T1: 0.42 (satélite)

Austin e York (2016)

Outras aplicações

Systems Engineering Management - Earned Readiness Management

ACRA-actual cost of readiness achieved
 BCRS-budgeted cost of readiness scheduled
 Readiness Variance

Year	Target SRL	TRL	IRL
1	2	3	4
2	3	4	5
3	4	5	6
4	5	6	7
5	6	7	8
6	7	8	9
7	8	9	10
8	9	10	11
9	10	11	12
10	11	12	13
11	12	13	14
12	13	14	15
13	14	15	16
14	15	16	17
15	16	17	18
16	17	18	19
17	18	19	20
18	19	20	21
19	20	21	22
20	21	22	23
21	22	23	24
22	23	24	25
23	24	25	26
24	25	26	27
25	26	27	28
26	27	28	29
27	28	29	30
28	29	30	31
29	30	31	32
30	31	32	33
31	32	33	34
32	33	34	35
33	34	35	36
34	35	36	37
35	36	37	38
36	37	38	39
37	38	39	40
38	39	40	41
39	40	41	42
40	41	42	43
41	42	43	44
42	43	44	45
43	44	45	46
44	45	46	47
45	46	47	48
46	47	48	49
47	48	49	50
48	49	50	51
49	50	51	52
50	51	52	53
51	52	53	54
52	53	54	55
53	54	55	56
54	55	56	57
55	56	57	58
56	57	58	59
57	58	59	60
58	59	60	61
59	60	61	62
60	61	62	63
61	62	63	64
62	63	64	65
63	64	65	66
64	65	66	67
65	66	67	68
66	67	68	69
67	68	69	70
68	69	70	71
69	70	71	72
70	71	72	73
71	72	73	74
72	73	74	75
73	74	75	76
74	75	76	77
75	76	77	78
76	77	78	79
77	78	79	80
78	79	80	81
79	80	81	82
80	81	82	83
81	82	83	84
82	83	84	85
83	84	85	86
84	85	86	87
85	86	87	88
86	87	88	89
87	88	89	90
88	89	90	91
89	90	91	92
90	91	92	93
91	92	93	94
92	93	94	95
93	94	95	96
94	95	96	97
95	96	97	98
96	97	98	99
97	98	99	100

Magnaye et al., 2014; Sauser, Ramirez-Marquez, 2010;

Fonte: Produção do autor.

B.3 Questionário utilizado

A Figura B.2 apresenta o questionário utilizado na etapa de avaliação.

Figura B.2 – Questionário utilizado na etapa de avaliação.

Questionário IRL

Avaliação da escala Integration Readiness Levels (IRL) e de sua aplicação a partir de visões de arquitetura

* Required

1. Nome do entrevistado *

Avaliação da Escala IRL

UTILIDADE

2. A escala IRL poderia ser útil para análise de arquitetura e acompanhamento da evolução da integração do sistema?

Mark only one oval.

Sim

Não

EFICÁCIA

3. A escala IRL consegue representar a maturidade do esforço de integração do sistema?

Mark only one oval.

1 2 3 4 5

4. A avaliação através da escala IRL complementa a avaliação através da escala TRL?

Mark only one oval.

Sim

Não

(continua)

Figura B.2 – Continuação.

OUTRAS QUESTÕES

5. Como o IRL poderia se relacionar com suas atividades no CBERS?

6. Quais tipos de aplicações do IRL lhe despertaram maior interesse?

Check all that apply.

- Análise da arquitetura do sistema e quantificar impactos de mudanças.
- Acompanhamento da evolução da integração do sistema.
- Análises numéricas utilizando a escala IRL.

7. Você consegue identificar outras possíveis aplicações do IRL, que não foram apresentadas? Quais?

8. No contexto do CBERS, no qual o sistema é desenvolvido e testado em conjunto por dois países, a importância da escala IRL poderia ser maior?

Mark only one oval.

- Sim
- Não
- Talvez

9. As aplicações numéricas da literatura derivadas das escalas de maturidade (TRL, IRL, SRL) poderiam lhe ser úteis? Quais?

(continua)

Figura B.2 – Continuação.

Avaliação da aplicação da Escala IRL a partir de visões de arquitetura

UTILIDADE

10. Poderia ser útil avaliar a escala IRL a partir de visões de arquitetura?

Mark only one oval.

- Sim
 Não

11. Os novos métodos propostos poderiam ser úteis para avaliar a escala IRL a partir de visões de arquitetura?

Mark only one oval.

- Sim, ambos
 Sim, o método DMM
 Sim, o método DSM
 Não

EFICÁCIA

12. Avalie a facilidade para REALIZAR a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura...

Mark only one oval per row.

	1	2	3	4	5
... para o método DMM	<input type="radio"/>				
... para o método DSM	<input type="radio"/>				

13. Avalie a facilidade para VISUALIZAR a avaliação da escala IRL a partir de visões de arquitetura...

Mark only one oval per row.

	1	2	3	4	5
... para o método DMM	<input type="radio"/>				
... para o método DSM	<input type="radio"/>				

14. Avalie a capacidade de ressaltar as INTERAÇÕES entre os elementos do sistema...

Mark only one oval per row.

	1	2	3	4	5
... para o método DMM	<input type="radio"/>				
... para o método DSM	<input type="radio"/>				

15. Avalie a capacidade de ressaltar as MÚLTIPLAS VISÕES de arquitetura do sistema...

Mark only one oval per row.

	1	2	3	4	5
... para o método DMM	<input type="radio"/>				
... para o método DSM	<input type="radio"/>				

(continua)

Figura B.2 – Conclusão.

16. **Avalie a potencial importância das seguintes capacidades:**

Mark only one oval per row.

	1	2	3	4	5
Ressaltar as INTERAÇÕES entre os elementos do sistema	<input type="radio"/>				
Ressaltar as MÚLTIPLAS VISÕES de arquitetura do sistema	<input type="radio"/>				
Extrair índices compostos já existentes (como o SRL)	<input type="radio"/>				
Extrair possíveis índices compostos voltados para visões de arquitetura	<input type="radio"/>				

Comentários

17. **Comentários opcionais sobre a escala IRL, a pesquisa, o questionário ou outros temas não cobertos.**

Powered by
 Google Forms

Fonte: Produção do autor, utilizando o software “Google Formulários”.

B.4 Dados coletados nas entrevistas

A seguir são apresentados os dados coletados nas entrevistas através do questionário. A Tabela B.2 apresenta os dados relativos às perguntas com respostas de múltipla escolha, enquanto que a Tabela B.3 apresenta os dados relativos às perguntas com respostas discursivas. As referências de perguntas e respondentes contidas nestas tabelas são correspondentes às referências apresentadas B.3 e B.1.

Tabela B.2 – Dados coletados referentes às perguntas com respostas de múltipla escolha.

ID	Perguntas																		
	2	3	4	6	8	10	11	12a	12b	13a	13b	14a	14b	15a	15b	16a	16b	16c	16d
1	Sim	4	Sim	a) , b)	Talvez	Sim	Sim, ambos	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
2	Sim	4	Sim	a)	Sim	Sim	Sim, ambos	3	3	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4
3	Sim	4	Sim	a)	Sim	Sim	Sim, ambos	4	4	3	3	4	5	5	4	5	4	4	
4	Sim	4	Sim	a)	Talvez	Sim	Sim, ambos	4	3	4	3	4	3	4	3	4	4	3	3
5	Sim	3	Sim	a) , b) , c)	Talvez	Sim	Sim, ambos	4	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	3
6	Sim	5	Sim	a) , b) , c)	Sim	Sim	Sim, ambos	4	-	5	5	5	4	5	4	5	5	5	5
7 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Sim	5	Sim	b)	Sim	Sim	Sim, ambos	-	-	4	5	3	5	5	5	5	5	4	4
10	Sim	5	Sim	b)	Sim	Sim	Sim, ambos	-	-	4	4	5	4	5	4	5	4	5	4
11	Sim	4	Sim	a) , b) , c)	Talvez	Sim	Sim, ambos	4	4	4	5	4	5	4	5	5	5	4	
12	Sim	4	Sim	a) , b) , c)	Talvez	Sim	Sim, ambos	-	5	4	5	4	4	4	4	4	5	4	3

Fonte: Produção do autor, a partir dos dados coletados.

Tabela B.3 – Dados coletados referentes às perguntas com respostas discursivas.

P.	ID	Resposta
5	1	Sim, poderia ser utilizado no momento da criação do "Satellite Design, Development and Verification Plan".
	2	-
	3	-
	4	-
	5	-
	6	No OBDH do CBERS IRLs podem se relacionar como métricas das diversas interfaces ao qual o S/S tem.
	7 8	Considerando o contexto de desenvolvimento de sistemas espaciais do INPE/ETE, onde as análises de dependabilidade ocorrem nas fases iniciais do projeto (descida do "V") e não dependem diretamente do quanto os elementos já foram testados, é possível concluir que a escala IRL não se relaciona diretamente com as atividades do grupo de dependabilidade.
	9	A comparação da classificação da escala IRL com a realidade do projeto naquele momento (milestone) orienta sobre o nível de cobrança (a ser exigida pela garantia do produto).
	10	A importância básica da escala IRL para verificação é acompanhar a evolução da integração do sistema. Uma dificuldade poderia ser de realizar a avaliação entre curtos períodos de tempo, já que no estudo de caso do CBERS aparentemente a escala consegue captar a evolução em grandes períodos de tempo (por exemplo, entre PDR e CDR). Se a avaliação da escala IRL fosse realizada após o AIT do CBERS, seria possível visualizar o quanto que as atividades de verificação poderiam influenciar a avaliação da escala IRL. A escala IRL parece ser interessante como uma ferramenta de comunicação gerencial, permitindo a avaliação da integração através de uma escala objetiva. A partir desta avaliação também poderiam ser criados alertas para identificar pontos que necessitariam maior atenção.
	11	Quando aplicada no início de um projeto, a escala poderia auxiliar a avaliar o estágio atual e dificuldades que poderiam ser encontradas nas próximas atividades do projeto, que é um dos grandes desafios que se tem.
	12	Para o acompanhamento gerencial.

(continua)

Tabela B.3 – Continuação.

P.	ID	Resposta
7	1	Relacionamento com os estudos de risco ("Risk Analysis").
	2	-
	3	-
	4	-
	5	-
	6	Obtido um SRL para um determinado projeto e num instante do seu ciclo de vida, um sistema baseado em regras poderia ser alocado para "sugerir" ações corretivas, se acaso for, a um gestor de projeto ou arquiteto.
	7 8	-
	9	Mapeamento para requisitos das fases dos programas.
	10	Seria interessante definir qual seria o SRL desejado para o início das atividades de integração.
	11	Poderia ser utilizada para avaliar a maturidade da infraestrutura de teste do satélite.
	12	Acompanhamento gerencial para coordenadores e diretores.
	9	1
2		Sim.
3		-
4		-
5		-
6		Sim. Todas são.
7 8		-
9		Sim. Todas dependendo da fase do programa e do que está sendo avaliado.
10		Sim.
11		Sim. Seria interessante o SRL para ter uma ideia geral da integração. Em relação à associação com informações de custo, poderia ser mais difícil conseguir contabilizar com precisão o custo de desenvolvimento de novos equipamentos, já com o uso de itens de prateleira a precisão poderia ser maior.
12		Sim. Valores versus fase, ou versus verificação.

(continua)

Tabela B.3 – Conclusão.

P.	ID	Resposta
17	1	Seria importante ter na literatura estudos que mostrem a aplicação em projetos reais e quais foram os benefícios de se utilizar a escala IRL.
	2	-
	3	Sugestão: colocar gradações de cores (por exemplo 3 níveis) para identificar níveis IRL baixos, médios e altos, a fim de melhorar a visualização das matrizes IRL.
	4	-
	5	-
	6	-
	7 8	-
	9	Eu gostaria de ter o mapeamento mencionado na resposta 7.
	10	-
	11	Esta ferramenta ainda não é utilizada no INPE, portanto as respostas a este questionário são mais teóricas. Para implementar esta ferramenta em projetos do INPE possivelmente necessitaria de pessoal que conheça o sistema e conheça a metodologia da ferramenta. No entanto, a principal dificuldade seria dedicar pessoal a esta atividade, devido às atuais condições de restrições de recursos para execução dos projetos.
	12	A pergunta sobre a eficácia da escala IRL em representar a maturidade do esforço de integração do sistema recebeu a nota 4, devido à percepção de que algumas avaliações do estudo de caso classificados como TRL e IRL em nível 3 poderiam estar informando níveis de risco acima dos níveis reais percebidos, já que são utilizadas tecnologias e processos já dominados.

Fonte: Produção do autor, a partir dos dados coletados.

APÊNDICE C – CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCALA IRL

Esta seção apresenta considerações do autor sobre a relação da escala IRL com normas internacionais de interesse. Estas considerações apoiaram a aplicação da escala IRL nesta pesquisa, e também poderão apoiar outros praticantes da escala IRL. São apresentados os passos para a criação de uma lista de itens de informação para servir de apoio à escala IRL, e exemplos de sua aplicação. Também são apresentadas considerações sobre a relação da escala IRL com atividades de desenvolvimento de uma missão espacial.

É recomendado ao leitor que utilize as normas citadas como apoio à leitura desta seção, e se familiarize com os termos e definições utilizados, que se encontram nas respectivas normas citadas.

C.1. Lista de documentos para evidências da escala IRL

Esta seção apresenta o trabalho realizado a fim de estabelecer os tipos de documentos que poderiam servir como evidências para a escala IRL, a partir de normas internacionais relacionadas ao assunto.

Embora as práticas de engenharia de sistemas e suas documentações propostas variam entre organizações, há esforços internacionais de normatização com o objetivo de atender a um amplo conjunto de usuários, criando normas suficientemente genéricas sem comprometer a sua utilidade prática. Uma série de normas na área de engenharia de sistemas foram publicadas em conjunto pelas organizações *International Organization for Standardization* (ISO), *International Electrotechnical Commission* (IEC) e *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). A norma internacional ISO/IEC/IEEE 15288:2015 (2015) estabelece uma base comum de descrições de processos para descrever o ciclo de vida de um sistema. A norma internacional ISO/IEC/IEEE 15289:2017 (2017) especifica o propósito e conteúdo de itens de informação (documentação) para o ciclo de vida de um sistema, de acordo com cada processo de ciclo de vida.

A seguir é proposta uma seleção de itens de informação como documentação de apoio a fim de complementar a avaliação da escala IRL, que consistiu em três principais passos. No primeiro passo, foram identificados os processos do ciclo de vida do sistema executados em cada nível IRL, de acordo com a norma ISO/IEC/IEEE 15288 (2015). No passo seguinte foram selecionados itens de informação da norma ISO/IEC/IEEE 15289 (2017) que correspondessem aos processos de ciclo de vida previamente identificados e que melhor representassem as evidências necessárias para a avaliação da escala IRL. O terceiro passo consistiu em propor uma lista de itens de informação para avaliação de cada nível da escala IRL, com base nos itens de informação previamente selecionados.

Para testar o desenvolvimento proposto, foi realizada pesquisa documental no projeto de desenvolvimento de satélites da série CBERS.

Desenvolvimento da lista

A escala IRL, como ilustrada na Tabela E.1, representa a evolução da integração entre elementos de um sistema. A última coluna na Tabela E.1 visa detalhar cada nível IRL e apoiar uma avaliação da escala IRL baseada em evidências.

A norma ISO/IEC/IEEE 15288 (2015) define os processos do ciclo de vida de um sistema, apresentando seus propósitos, resultados esperados, exemplos de itens de informação relacionados e outras prescrições. De acordo com a norma ISO/IEC/IEEE 15289 (2017), um item de informação é um corpo de informação produzido para uso humano, sendo separadamente identificável.

O primeiro passo da elaboração da lista proposta foi analisar quais processos de ciclo de vida melhor representavam cada nível IRL, através da comparação entre as definições de cada nível da escala IRL e os propósitos e resultados esperados dos processos de ciclo de vida da norma ISO/IEC/IEEE 15288 (2015). A Tabela C.1 apresenta os resultados desta etapa. Na Tabela C.1, as correlações marcadas com um “X” representam que o processo de ciclo de

vida correspondente apresenta resultados esperados que são informações principais para as evidências necessárias do nível IRL correspondente. As correlações marcadas com um “O” foram posteriormente adicionadas, como será explicado mais adiante, e representam que o processo apresenta resultados que são informações de apoio para documentar as evidências necessárias do nível IRL correspondente.

Tabela C.1 – Processos do ciclo de vida selecionados para cada nível IRL.

Processos do ciclo de vida de um sistema ISO/IEC/IEEE 15288 (2015)	Níveis de Maturidade de Integração (IRL)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Definição das necessidades e requisitos das partes interessadas	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-
Definição dos requisitos de sistema	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-
Definição da arquitetura	-	-	-	X	O	O	O	O	O	O
Definição do <i>design</i>	-	-	-	-	-	O	O	O	O	O
Verificação	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-
Integração	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-
Operação	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X

Legenda: “-” Não se aplica; “X” Principais informações; “O” Informações de apoio.

Fonte: Produção do autor.

Em relação aos resultados da Tabela C.1, o processo de ciclo de vida selecionado para o nível IRL 1 visa definir as necessidades e requisitos das partes interessadas no sistema, produzindo o documento de conceito de operações (BLANCHARD; FABRYCKY, 2006) que expressa conceitos de alto nível de integração. Para IRL 2, o processo de ciclo de vida selecionado produz os requisitos do sistema (BLANCHARD; FABRYCKY, 2006) e a descrição do

sistema, contendo suas principais interfaces. Selecionado para IRL 3, o processo de ciclo de vida de definição da arquitetura expressa a arquitetura do sistema, que identifica e define a descrição inicial das interfaces, que podem ainda ser refinadas durante o processo de ciclo de vida de definição do *design*.

Ainda, os níveis IRL de 4 a 7 representam marcos alcançados na avaliação do *design* (BLANCHARD; FABRYCKY, 2006; NASA, 2017) relacionados com o desenvolvimento de interfaces, que compreendem as atividades de verificação e validação. Os termos verificação e validação são frequentemente utilizados com significados distintos (SELLERS et al., 2009). A atividade de verificação confirma que o sistema atende aos requisitos técnicos e é aplicada em muitos níveis na estrutura hierárquica do sistema, enquanto a validação confirma que o sistema atende às expectativas das partes interessadas e normalmente é realizada nos níveis mais altos da estrutura hierárquica do sistema (LARSON et al., 2009). Considerando que a verificação iria ocorrer antes que a validação ao avaliar as interfaces do sistema, e dado que a norma ISO 16290 (2013) prescreve atividades de verificação para documentar as evidências da escala TRL, o processo de ciclo de vida de verificação foi selecionado para representar os níveis IRL de 4 a 7. Mesmo que estes níveis IRL representem testes em diferentes condições, os documentos de verificação, tais como os procedimentos e relatórios de testes apresentam os mesmos tipos de informações, de modo que uma lista comum de itens de informação pode atender a toda esta faixa de níveis IRL.

Além disso, o processo de ciclo de vida de integração foi selecionado para representar o nível IRL 8, já que a finalidade deste processo é integrar o sistema realizado. Finalmente, o processo de ciclo de vida de operação é voltado a operar o sistema realizado e monitorar o seu desempenho, e foi selecionado para representar o nível IRL 9.

No segundo passo deste desenvolvimento, na norma ISO/IEC/IEEE 15289 (2017) foi encontrado um conjunto de itens de informação recomendados para documentar o resultado esperado de cada um destes processos, bem como uma definição completa de cada item de informação. Este conjunto de itens de

informação recomendados foi então filtrado, a fim de selecionar os itens de informação mais relevantes que pudessem documentar as evidências necessárias para avaliação da escala IRL. Os itens de informação selecionados como mais relevantes para documentar as evidências necessárias para avaliação da escala IRL são apresentados na Tabela C.2.

Tabela C.2 – Itens de informação selecionados para cada processo de ciclo de vida.

Processos do ciclo de vida de um sistema ISO/IEC/IEEE 15288 (2015)	Itens de informação recomendados e que representam as evidências necessárias da escala IRL ISO/IEC/IEEE 15289 (2017)
Definição das necessidades e requisitos das partes interessadas	Conceito de operações
Definição dos requisitos de sistema	Descrição da arquitetura de sistema
	Especificação dos requisitos de sistema
Definição da arquitetura	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição inicial de interfaces
Definição do design	Descrição de interfaces
Verificação	Procedimento de verificação
	Relatório de verificação
Integração	Documentação do usuário (procedimentos de montagem)
	Relatório de integração e testes
Operação	Relatório de monitoramento e controle (relatório de operação)

Fonte: Produção do autor.

Lista proposta

Finalmente, o autor propôs uma lista de itens de informação para cada nível da escala IRL. A Tabela C.3 apresenta esta proposta.

Tabela C.3 – Itens de informação selecionados para cada processo de ciclo de vida.

IRL	Itens de informação propostos para documentar a avaliação de cada nível IRL ISO/IEC/IEEE 15289 (2017)
0	-
1	Conceito de operações
2	Descrição da arquitetura de sistema
	Especificação dos requisitos de sistema
3	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição inicial de interfaces
4	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição inicial de interfaces
	Procedimento de verificação
	Relatório de verificação
5	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição de interfaces
	Procedimento de verificação
	Relatório de verificação
6	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição de interfaces
	Procedimento de verificação
	Relatório de verificação

Continua

Tabela C.3 – Conclusão.

IRL	Itens de informação propostos para documentar a avaliação de cada nível IRL ISO/IEC/IEEE 15289 (2017)
7	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição de interfaces
	Procedimento de verificação
	Relatório de verificação
8	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição de interfaces
	Documentação do usuário (procedimentos de montagem)
	Relatório de integração e testes
9	Descrição da arquitetura de sistema
	Descrição de interfaces
	Relatório de monitoramento e controle (relatório de operação)

Fonte: Produção do autor.

A lista proposta de itens de informação apresenta não só os principais itens de informação que representam as evidências necessárias para cada nível IRL, conforme classificado na Tabela C.1, mas também apresenta itens de informação de apoio para fornecer um conjunto completo de documentação. Por exemplo, a descrição da arquitetura de sistema e descrição de interfaces são propostos para documentar os níveis IRL de 4 a 9, para melhor registrar como eram as interfaces e a arquitetura de sistema utilizadas na avaliação da escala IRL. Outro exemplo consiste na proposta de itens de informação relacionados com os procedimentos, tais como procedimentos de verificação e procedimentos de montagem, a fim de complementar os respectivos relatórios

de resultados. A lógica na proposição de itens de informação de apoio foi baseada nos padrões de informações requeridos para avaliação da escala TRL encontradas na norma ISO 16290 (2013) e descritos por ECSS (2017). Além disso, a norma ISO/IEC/IEEE 15288 (2015) acrescenta para a definição de verificação que as características a serem verificadas incluem: a descrição do *design*, os requisitos e o próprio sistema. Requisitos de verificação devem ser incluídos no relatório de verificação, de acordo com a norma ISO/IEC/IEEE 15289 (2017).

A lista proposta de itens de informação foi projetada para ser utilizada como um complemento para a escala IRL atual, a fim de auxiliar a sua avaliação. A norma ISO/IEC/IEEE 15289 (2017) contém definições completas sobre os itens de informação e podem apoiar os praticantes com esta aplicação, se necessário.

Relação com o estudo de caso

A próxima etapa da pesquisa foi conduzir a pesquisa documental com satélites do programa CBERS, a fim de testar a lista de itens de informação proposta com dados empíricos. Para realizar o teste, foram executadas duas atividades.

A primeira atividade consistiu em analisar os documentos que definiram o padrão de conteúdo e codificação dos documentos do projeto (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2013) relacionados aos satélites CBERS, a fim de encontrar quais tipos de documentos eram equivalentes aos itens de informações propostos na Tabela C.2. Foram encontrados documentos equivalentes para todos os itens de informação propostos. Para alguns itens de informação, mais de um tipo de documento dos satélites era necessário para cobrir o escopo de um item de informação proposto. A Tabela C.4 apresenta estes resultados. A divulgação dos dados da Tabela C.4 foi autorizada pela gerência do programa CBERS.

Tabela C.4 – Tipos de documentos encontrados no estudo de caso.

Itens de informação propostos para documentar a avaliação de cada nível IRL ISO/IEC/IEEE 15289 (2017)	Tipos de documentos do estudo de caso
Conceito de operações	<i>IFD – Interface Data Documents</i>
Descrição da arquitetura de sistema	<i>IFD – Interface Data Documents</i>
	<i>SAD – Software Architecture Design</i>
	<i>REV – Project Review</i>
Especificação dos requisitos de sistema	<i>RQS – Requirement Specification</i>
	<i>IFS – Interface Specification</i>
	<i>DCS – Design and Constructions Specification</i>
	<i>EMS – EMC Specification</i>
	<i>EVS – Environmental Specification</i>
	<i>HDS – Hardware Specification</i>
	<i>SRS – Software Requirements Specifications</i>
Descrição de interfaces	<i>IDS – Interface Data Sheet</i>
Procedimento de verificação	<i>HVP – Hardware Verification Plan</i>
	<i>SVP – Software Verification and Validation Plan</i>
	<i>TES -Test Specification</i>
	<i>TSP -Test Procedure</i>
	<i>VCD -Verification Control Document</i>

continua

Tabela C.4 – Conclusão.

Itens de informação propostos para documentar a avaliação de cada nível IRL ISO/IEC/IEEE 15289 (2017)	Tipos de documentos do estudo de caso
Relatório de verificação	<i>SVR - Software Verification and Validation Report</i>
	<i>TAR – Test Analysis Report</i>
	<i>TDR – Test Data Report</i>
	<i>VER -Verification Report</i>
	<i>TRP – Technical Report</i>
Documentação do usuário (procedimentos de montagem)	<i>AIT– Assembly, Integration and Test</i>
Relatório de integração e testes	<i>AIT– Assembly, Integration and Test</i>
	<i>VER -Verification Report</i>
Relatório de monitoramento e controle (relatório de operação)	<i>TRP – Technical Report</i>

Fonte: Produção do autor.

A segunda atividade consistiu na coleta e análise dos documentos dos satélites identificados, a fim de analisar se seu conteúdo era equivalente ao conteúdo esperado do item de informação proposto, conforme descrito na norma ISO/IEC/IEEE 15289 (2017). Foi analisado pelo menos um documento dos satélites para cada item de informação proposto. Os conteúdos foram equivalentes em relação ao conteúdo esperado. Devido ao sigilo dos documentos, estes não estão identificados.

Discussão

Como as duas atividades obtiveram sucesso em seus resultados, considera-se que a lista de itens de informação proposta nesta pesquisa foi testada com sucesso para o estudo de caso realizado. Ainda, em relação aos benefícios

práticos que a lista proposta pode oferecer, o autor expressa que foi mais fácil encontrar os documentos de evidências necessárias para avaliação da escala IRL após a utilização da lista proposta, o que também pode contribuir para a objetividade e precisão da avaliação.

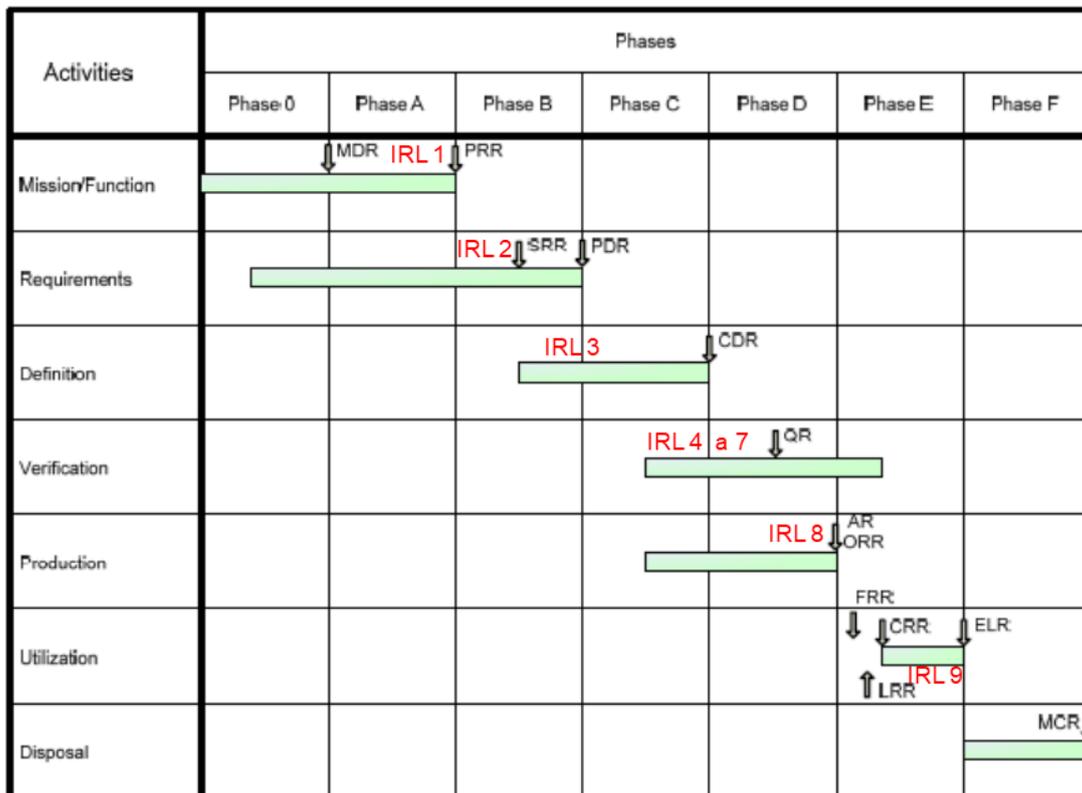
Através dos resultados relatados neste Apêndice, alguns tópicos de discussão podem ser ressaltados. A correspondência entre os processos de ciclo de vida de um sistema e a escala IRL, mostrados na Tabela C.1, pode auxiliar profissionais interessados em se familiarizar com a escala IRL a relacionar os níveis IRL aos marcos do processo de desenvolvimento de sistema utilizado. A Tabela C.1 também auxilia a indicar que os níveis IRL inferiores são mais relacionados com a definição da arquitetura de sistema, enquanto que os níveis IRL intermediários representam a avaliação do desenvolvimento de interfaces, e os níveis IRL mais altos se referem à avaliação de desempenho da integração. Apesar de que os termos verificação e validação (V&V) são frequentemente utilizados na prática com significados diferentes, o processo de verificação foi selecionado para representar os níveis IRL de 4 a 7. A Tabela C.2 mostra os itens de informação selecionados para esta pesquisa, enquanto a Tabela C.3 apresenta a lista de itens de informação proposta para apoiar a avaliação da escala IRL. Esta lista é composta por itens de informação principais que representam diretamente as evidências necessárias para a escala IRL, e itens de informação como apoio a estes principais, a fim de ter um conjunto completo de registros para documentação.

C.2. Relação com as normas do padrão ECSS

Esta seção apresenta considerações do autor a fim de ilustrar como a escala IRL, conforme ilustrada na Tabela E.1, poderia se relacionar com as atividades desenvolvidas durante o ciclo de vida de um projeto de acordo com a norma ECSS-M-ST-10C (2009a), de maneira análoga ao representado pela Tabela C.1 em relação à norma ISO/IEC/IEEE 15288 (2015).

A Figura C.1 foi adaptada da norma ECSS-M-ST-10C (2009a) e contém indicações, na cor vermelha, das possíveis relações de níveis IRL com as atividades representadas na figura original.

Figura C.1 – Possíveis relações da escala IRL com atividades do ciclo de vida de projetos do padrão ECSS.



Fonte: Adaptado de ECSS (2009a).

Se considerarmos o desenvolvimento de um novo sistema, a escala IRL poderia se relacionar com as atividades do ciclo de vida de um projeto espacial descrito pela norma ECSS-M-ST-10C (2009a) da seguinte maneira: O nível IRL 1, quando aplicado às principais interfaces do sistema, estaria relacionado com o desenvolvimento do conceito de sistema, conforme define a norma ECSS-E-ST-10C (2017b). O nível IRL 2, quando aplicado às principais interfaces do sistema, estaria relacionado com a especificação de requisitos das principais interfaces do sistema. O nível IRL 3 estaria relacionado com a definição inicial de interfaces, que de acordo com a norma ECSS-E-ST-10-24C (2015) normalmente ocorre até a revisão de projeto PDR relacionada ao item em

desenvolvimento cuja interface está sob análise. Os níveis IRL 4 a 7 estariam relacionados principalmente à verificação de interfaces utilizando diferentes condições de testes, conforme define a escala IRL, e irão depender da filosofia de verificação definida para o desenvolvimento do satélite. O nível IRL 8 estaria relacionado à integração física do modelo de voo do satélite e deveria ocorrer até a revisão de projeto AR segundo a norma ECSS-M-ST-10C (2009a). O nível IRL 9 estaria relacionado com a comprovação de sucesso em voo durante a fase de operação do satélite.

ANEXO D – CONTEÚDO DE NORMAS DE INTERESSE

D.1. Normas do sistema ECSS

A norma ECSS-M-ST-10C “*Project planning and implementation*” (2009a) descreve os elementos principais para o planejamento e implementação de projetos e identifica os requisitos e produtos de alto nível, a fim de estabelecer um planejamento de projeto coerente e integrado com as demais normas do sistema ECSS. Esta norma apresenta o ciclo de vida de projetos na área espacial, com suas fases, revisões de projeto e principais atividades desenvolvidas.

A norma ECSS-E-ST-10C “*System engineering general requirements*” (2017b) divide o processo de engenharia de sistemas em cinco funções: engenharia de requisitos, análise de sistema, projeto e configuração, verificação, integração e controle. As principais tarefas da função de verificação são: definir e executar a verificação do produto, assegurar que a verificação é encerrada com êxito em cada fase do ciclo de vida do projeto.

A norma ECSS-E-ST-10-02C “*Verification*” (2009b) trata da verificação de sistemas espaciais, considerando organização cliente e organização fornecedora para definir os diferentes níveis hierárquicos e relacionamento entre as partes. De acordo com esta norma, a abordagem de verificação é estabelecida nas primeiras fases do projeto, analisando os requisitos a serem verificados e levando em consideração: peculiaridades e restrições do projeto, qualificação das soluções candidatas (categorias de produto), disponibilidade e maturidade dos instrumentos de verificação, métodos de verificação, restrições em órbita e dos segmentos para a fase em órbita (incluindo comissionamento), restrições programáticas, custo e cronograma. As seguintes etapas são realizadas para estabelecer a abordagem de verificação:

- Identificar "quais" são os produtos e requisitos sujeitos ao processo de verificação;

- Identificar "como" verificar os mesmos, considerando os métodos indicados na especificação técnica;
- Identificar "quando" implementar, aplicando a estratégia de verificação escolhida.

Essas etapas são geralmente conduzidas em um processo iterativo baseado em considerações técnicas, de custo e cronograma, garantindo que a abordagem está de acordo tanto pelo fornecedor quanto pelo cliente.

De acordo com a norma ECSS-E-ST-10-02C (2009b), o processo de verificação deve ser implementado como estágios subsequentes ao longo do ciclo de vida do projeto. A norma classifica como estágios da verificação:

- Qualificação: para verificar o design de sistema de acordo com seus requisitos;
- Aceitação: para garantir que o produto está de acordo com o design qualificado, livre de defeitos de fabricação e aceito para uso;
- Comissionamento: atividades de verificação e validação realizadas após o lançamento e antes da entrada em serviço operacional, tanto apenas nos elementos do segmento espacial, tanto no sistema como um todo incluindo os elementos do segmento solo;
- Pós-aterrisagem: para verificar a integridade e o desempenho do produto após a missão.

A norma ECSS-E-ST-10-02C (2009b) reconhece que testes e análises ocorrem durante o estágio de desenvolvimento do produto, mas não são abordados por esta norma, uma vez que não são atividades formais de verificação de requisitos no sentido da relação cliente-fornecedor.

De acordo com a norma ECSS-E-ST-10-02C (2009b), a verificação é realizada de forma incremental em diferentes níveis hierárquicos na decomposição do produto. O número e o tipo de níveis de verificação dependem da

complexidade do projeto e de suas características. Os níveis de verificação para um produto espacial normalmente são: equipamento, subsistema, elemento, segmento e sistema.

De acordo com a norma ECSS-E-ST-10-02C (2009b), a verificação deve ser realizada através de um ou mais dos seguintes métodos de verificação (por ordem do maior para menor nível de confiança):

- Teste: método de verificação por medição do desempenho do produto e das funções em ambientes representativos simulados;
- Análise: método de verificação que realiza uma avaliação teórica ou empírica utilizando técnicas específicas, podendo ser análise por similaridade;
- Revisão de projeto: método de verificação usando registros aprovados ou evidências que mostram inequivocamente que o requisito é cumprido;
- Inspeção: determinação visual de características físicas do produto.

De acordo com a norma ECSS-E-ST-10-02C (2009b), para cada requisito verificado apenas por análise ou revisão de projeto, deve ser realizada uma avaliação de risco para determinar o impacto (maior / menor) deste requisito na missão.

De acordo com ECSS (2017c) e ECSS (2010), uma Filosofia de Modelos e Testes precisa ser estabelecida, devido a que a qualificação do design necessita de testes extensivos, o teste do modelo de voo somente não é eficiente por ser tarde demais para encontrar problemas e seria muito caro para corrigir o design quando o sistema já está integrado, e os testes extensivos podem ser prejudiciais à vida útil do sistema espacial. Modelos adicionais do hardware de voo são necessários, para permitir testes antecipados para uma qualificação eficaz. Pela experiência, é conveniente separar em nível do sistema, os aspectos de design térmico e mecânico do aspecto de design funcional, desta maneira:

- Normalmente um Modelo Estrutural-Térmico (STM) é construído para qualificar o design térmico e mecânico;
- Um Modelo de Engenharia (EM) normalmente é construído para qualificar o design funcional.

De acordo com ECSS (2017c), normalmente são aplicadas as abordagens de verificação do tipo protótipo e do tipo *protoflight*. Na abordagem de verificação do tipo protótipo a qualificação é alcançada em um modelo dedicado de representação completa do sistema de voo (geralmente dividido entre STM e EM) enquanto apenas a aceitação ocorre no modelo final de voo (FM), também se aplicando ao nível de equipamento. Na abordagem de verificação do tipo *protoflight* a qualificação e aceitação ocorrem ao mesmo tempo no modelo final de voo (PFM), também se aplicando ao nível do equipamento. Na prática a abordagem mais utilizada é uma abordagem híbrida:

- Os modelos de qualificação (QM ou EQM) são utilizados no nível hierárquico mais baixo (nível do subsistema e do equipamento) para as partes mais críticas ou inovadoras, e a abordagem *protoflight* é aplicada ao nível do elemento do segmento espacial;
- Um modelo Térmico Estrutural (STM) é definido para a parte mecânica. Este pode ser restaurado para utilização no modelo *protoflight* (PFM) se as margens de construção forem altas, ou descartado após o uso.
- Modelo de engenharia (EM) ao nível hierárquico do sistema é limitado a um certo grau de representatividade elétrica, de interfaces e funcional. É às vezes chamado *Avionics Test Bench* (ATB).
- A verificação funcional do sistema é realizada por uma *Software Verification Facility* (SVF).

Os principais tipos de documentos e formas de controle de verificação segundo ECSS (2017c) e a norma ECSS-E-ST-10-02C (2009b) são:

- Plano de Verificação (parte do Plano de Engenharia do Sistema): Contém a abordagem geral de verificação, a filosofia de modelos, a matriz de produtos, as estratégias de verificação para os requisitos, os métodos e planejamento da verificação, as ferramentas e a organização responsável pela verificação.
- Documento de Controle de Verificação (VCD): lista os requisitos a serem verificados, os métodos selecionados, os estágios aplicáveis e os níveis hierárquicos estabelecidos. Este documento contém a Matriz de Verificação.
- Relatório de teste: descreve a execução de testes, avaliação técnica dos testes, resultados e conclusões sob a perspectiva dos requisitos de teste, incluindo os critérios de aprovação.
- A implementação do processo de verificação é monitorada pelo Conselho de Controle de Verificação (VCB): um conselho composto por representantes de clientes e fornecedores que, em última instância, avaliam a conclusão da verificação de requisitos.
- Os meios para monitorar o progresso da verificação são o VCD e o banco de dados de verificação.

De acordo com a norma ECSS-E-ST-10-02C (2009b), a implementação da verificação de sistemas espaciais pode ser auxiliada por ferramentas como: equipamentos de suporte em solo (GSE), infraestrutura para validação de software (SVF), simuladores, ferramentas de software para verificação por análise, infraestrutura de integração e testes e ferramentas de testes.

A norma ECSS-E-ST-10-03C "*Testing*" (2012) estabelece requisitos para testes no sistema espacial e em particular no segmento espacial, define os testes a serem realizados para qualificar e aceitar para voo todos os equipamentos classificados por "tipos" e os elementos do sistema espacial, define níveis e critérios de aprovação para os testes mencionados. De acordo com ECSS

(2017c) e a norma ECSS-E-ST-10-03C (2012) os testes são classificados segundo seus objetivos:

- Teste de desenvolvimento: usado para validar novos conceitos de projeto ou a aplicação de conceitos e técnicas comprovadas em uma nova configuração. Ocorre antes da qualificação e deve confirmar margens de desempenho, manufacturabilidade, testabilidade, manutenção, entre outros fatores.
- Teste de qualificação: é a demonstração formal de que a implementação do projeto e os métodos de fabricação resultaram em hardware e software de acordo com os requisitos de especificação. É também chamado teste de prototipagem em outros campos da engenharia.
- Teste de Aceitação: para demonstrar conformidade com a especificação de construção e para atuar como ferramenta de controle de qualidade para detectar defeitos de fabricação e erros de manufatura.
- Teste de *Protoflight*: é a combinação dos objetivos de testes de qualificação e de aceitação no primeiro modelo de voo.

A Tabela D.1 apresenta a correspondência com a escala TRL de alguns dos principais modelos utilizados para verificar sistemas espaciais, de acordo com ECSS (2017a) e as descrições traduzidas da norma ABNT ISO 16290 (2015).

Tabela D.1 – Tipos de modelos e sua correspondência na escala TRL.

Tipo de modelo	Correspondência na escala TRL
Analítico	TRL 3
Maquete (<i>breadboard</i>)	TRL 4-5
Modelo de engenharia em menor escala	TRL 5
Modelo de engenharia	TRL 6
Estrutural	TRL 6
Térmico	TRL 6
Térmico-estrutural	TRL 6
Qualificação	TRL 7
Voo	TRL 8-9
<i>Protoflight</i>	TRL 7-9

Fonte: Adaptado de ECSS (2017a); ABNT ISO 16290 (2015).

A norma ECSS-E-ST-10-24C “*Interface Management*” (2015) descreve o processo de gerenciamento e controle de interfaces, que é uma atividade crítica em engenharia de sistemas. Uma interface consiste em duas ou mais extremidades de interface mais a conexão entre elas. O processo de gerenciamento e controle de interfaces consiste em:

- Planejamento da gestão de interfaces: Define a abordagem, os requisitos, as responsabilidades e o planejamento para a gestão de interfaces.

- Identificação de interfaces: Documento de identificação de interfaces (IID) para listar todas as interfaces relevantes do projeto.
- Especificação de requisitos de interfaces: O cliente define os requisitos aplicáveis à interface em documentos de requisitos de interface (IRD).
- Definição de interfaces: O fornecedor prepara uma descrição de sua extremidade de interface no chamado documento de definição de interface (IDD) ou ICD de extremidade única.
- Aprovação e controle: Uma vez que a interface é projetada, ela é definida e gerenciada através de um documento de controle de interface (ICD), adotado e acordado pelo cliente gerenciador e ambos os fornecedores das extremidades da interface. É aplicado um processo de gerenciamento de mudanças de interface, para controlar as mudanças solicitadas.
- Verificação e validação: Verificação e validação da interface.

De acordo com a norma ECSS-E-ST-10-24C (2015), o processo de verificação de interfaces segue a norma ECCS-E-ST-10-02 (2009b) e é realizado em três passos:

- Verificação precoce da compatibilidade do ICD com os requisitos da interface, sendo utilizada para chegar em uma versão aprovada do ICD por parte do fornecedor e do cliente.
- Demonstração da conformidade individual de extremidade de interface com o ICD, considerando os requisitos de verificação associados aos requisitos de interface, executados sob a responsabilidade do fornecedor do produto. Normalmente é realizada pelo fornecedor antes da entrega de cada produto.
- Verificação conjunta da interface em termos funcionais e de desempenho, envolvendo os diferentes produtos unidos pela interface,

realizada sob responsabilidade do cliente durante a integração dos vários produtos, considerando os requisitos de verificação do nível hierárquico superior.

De acordo com a norma ECSS-E-ST-10-24C (2015), a lógica de verificação pode incluir qualquer combinação de atividades de verificação individuais e conjuntas. A validação da interface é a atividade para demonstrar que a interface é capaz de realizar seu uso pretendido no ambiente operacional pretendido e pode ser executada como parte do gerenciamento de interface ou como parte de qualquer atividade de validação de produto do nível hierárquico superior.

A norma ECSS-E-ST-10-24C (2015) identifica três categorias de interfaces: interfaces internas aos segmentos Espacial, Solo ou Lançamento; interfaces entre os diferentes segmentos do Sistema Espacial; e interfaces entre o Segmento de Suporte e o Segmento Espacial, Segmento Terrestre ou Segmento de Lançamento. A natureza de uma interface implica um grupo de dados e particularidades relacionadas à interface, normalmente dependentes da disciplina de engenharia da interface. As naturezas de interfaces identificadas pela norma são: Sistema de Coordenadas e de Tempo, Ambiente espacial, Homem-máquina, Elétrica, Óptica, Controle térmico, Estrutural, Mecanismos, Propulsão, Aerodinâmica, Hidráulica, Representação de dados, Software, Comunicações, Controle, Operações e Materiais.

D.2. Normas do sistema ISO / IEC / IEEE

A norma ISO/IEC/IEEE 15288-2015 “*Systems and software engineering – System life cycle processes*” (2015), fornece uma estrutura de processo comum que cobre o ciclo de vida de sistemas. Este ciclo de vida abrange a concepção de ideias até o descarte de um sistema. Fornece processos para aquisição e fornecimento de sistemas. Além disso, esta estrutura prevê a avaliação e melhoria dos processos do ciclo de vida.

A norma ISO/IEC/IEEE 12207-2008 “*Systems and Software Engineering – Software Life Cycle Processes*” (2008) estabelece uma estrutura comum para processos de ciclo de vida do software, com terminologia bem definida, que pode ser referenciada pela indústria de software.

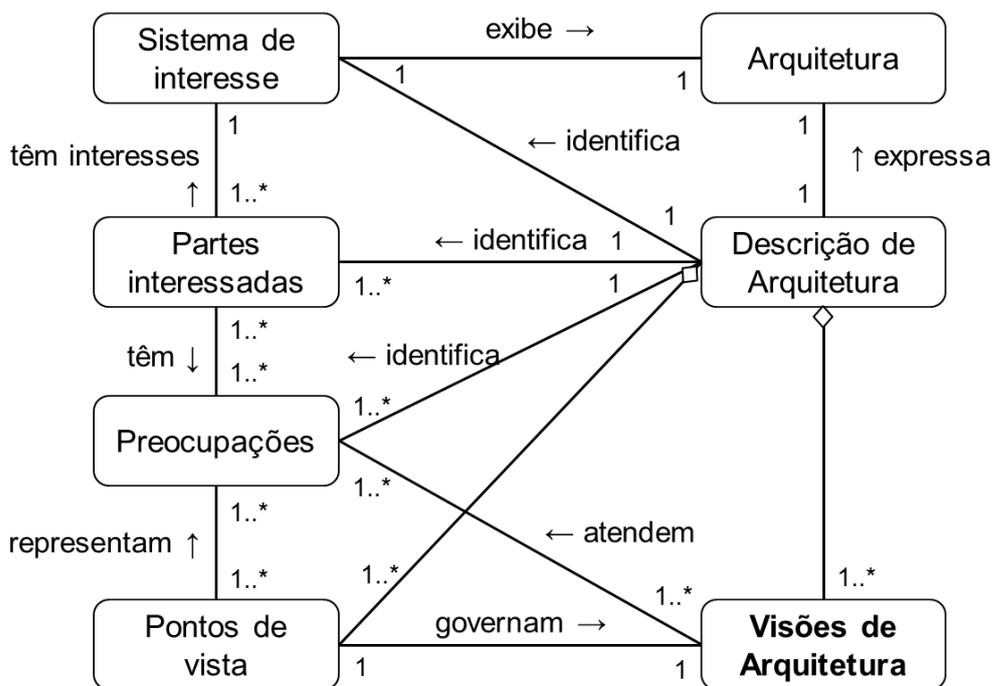
Tomadas em conjunto, as cinco partes das normas ISO/IEC 24748 (em diferentes publicações) destinam-se a facilitar a utilização conjunta do conteúdo do processo ISO/IEC/IEEE 15288 (2015) e ISO/IEC/IEEE 12207 (2008). Desta forma, as normas ISO/IEC 24748 fornecem orientações unificadas e consolidadas sobre o gerenciamento do ciclo de vida de sistemas e software. O objetivo é ajudar a garantir consistência nos conceitos do sistema e nos conceitos do ciclo de vida, modelos, estágios, processos, aplicação do processo, principais pontos de vista, adaptação e uso em vários domínios, uma vez que as duas normas Internacionais (e outras) são usados em conjunto. Isso deveria ajudar a modelar o ciclo de vida em projetos, a fim de gerenciar seu progresso.

A norma ISO/IEC/IEEE 42010-2011 “*Systems and software engineering - Architecture description*” (2011) aborda a criação, análise e sustentação de arquiteturas de sistemas através do uso de descrições de arquitetura. As descrições da arquitetura são utilizadas pelas partes que desenvolvem, utilizam e gerenciam sistemas modernos para melhorar a comunicação e a cooperação, permitindo que eles funcionem de forma integrada e coerente. Estruturas de arquitetura e linguagens de descrição de arquitetura estão sendo criadas como recursos que codificam as convenções e práticas comuns de arquitetura e a descrição de arquiteturas em diferentes comunidades e domínios de aplicação.

A norma ISO/IEC/IEEE 42010 (2011) define que uma arquitetura é abstrata, consistindo em conceitos e propriedades, enquanto uma descrição de arquitetura pode ser documentada. A Figura D.1 apresenta um modelo conceitual relativo à prática de descrição da arquitetura. Um sistema de interesse possui uma arquitetura, que é expressada por uma descrição de arquitetura. Uma descrição de arquitetura inclui uma ou mais visões de arquitetura. Uma visão de arquitetura aborda uma ou mais das preocupações

das partes interessadas do sistema. Uma visão de arquitetura expressa a arquitetura do sistema de interesse de acordo com um ponto de vista de arquitetura.

Figura D.1 – Modelo conceitual de uma descrição de arquitetura.



Fonte: Adaptado de ISO/IEC/IEEE 42010 (2011).

A norma ISO/IEC/IEEE 15289-2017 “*Systems and software engineering - Content of life-cycle information items (documentation)*” apresenta requisitos para identificar e planejar os itens de informação específicos (produtos de informação ou documentação) a serem desenvolvidos e revisados durante os ciclos de vida de sistemas e software e os processos de serviço. Esta norma especifica o propósito e o conteúdo de todos os itens identificados de informações sobre o ciclo de vida dos sistemas e software, bem como itens de informações para gerenciamento de serviços de tecnologia da informação. O conteúdo do item de informação é definido de acordo com os tipos genéricos de documentos e o propósito específico do documento. Os itens de informação são combinados ou subdivididos conforme necessário para projetos ou fins organizacionais.

A norma IEEE 1012-2012 “*System and Software Verification and Validation*” (2012) estabelece requisitos do processo do ciclo de vida de V&V para diferentes níveis de integridade. O escopo dos processos de V&V engloba sistemas, software e hardware, e inclui suas interfaces. Esta norma se aplica a sistemas que estão em desenvolvimento, manutenção ou reutilizados (legado ou item de prateleira), incluindo sua documentação. Os processos de V&V incluem a análise, avaliação, revisão, inspeção, avaliação e teste de produtos.

A norma ABNT NBR ISO 9000 “Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário” (2005) define que: Verificação é a comprovação, através de fornecimento de evidência objetiva, de que requisitos especificados foram atendidos. Validação é a comprovação, através do fornecimento de evidência objetiva, de que os requisitos para uma aplicação ou uso específicos pretendidos foram atendidos.

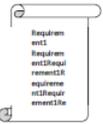
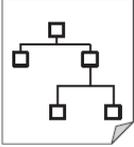
A norma ISO/IEC/IEEE 15288-2015 (2015) adiciona como nota à definição de verificação que: A verificação é um conjunto de atividades que compara um sistema ou elemento do sistema com as características necessárias. Isso inclui, mas não está limitado a: requisitos especificados, descrição do projeto e o próprio sistema.

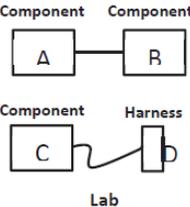
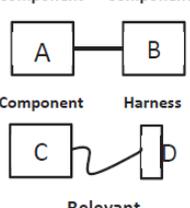
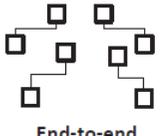
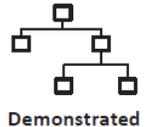
A norma ISO/IEC/IEEE 15288-2015 “*Systems and software engineering : system life cycle processes*” (2015) define que: Sistema é a combinação organizada de elementos que interagem para alcançar um ou mais objetivos pretendidos. Engenharia de sistemas é a abordagem interdisciplinar que rege o esforço técnico e gerencial total necessário para transformar um conjunto de necessidades, expectativas e restrições das partes interessadas em uma solução e apoiar essa solução ao longo de sua vida.

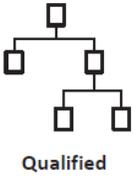
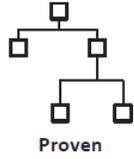
ANEXO E – ESCALA DE NÍVEIS DE MATURIDADE DE INTEGRAÇÃO

Esta seção apresenta a escala de níveis de maturidade de integração utilizada como referência.

Tabela E.1 – Definições, ilustrações e evidências necessárias da escala *Integration Readiness Levels*.

IRL	Definição atual	Ilustração	Evidências necessárias
0	Sem integração	-	Nenhuma integração entre elementos especificados foi planejada ou desejada.
1	Conceito de alto nível da integração foi identificado	 <p>Concept</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>
2	Há algum nível de especificidade de requisitos para caracterizar a interação entre elementos	 <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>

IRL	Definição atual	Ilustração	Evidências necessárias
4	Validação de funções entre elementos integrados em ambiente de laboratório		<p>A funcionalidade das tecnologias de integração (módulos/funções/montagens) foi demonstrada com sucesso em um ambiente laboratorial/sintético.</p> <p>Método (s) e especificações de transporte de dados foram definidos.</p>
5	Validação de funções entre elementos integrados em ambiente relevante		<p>Módulos individuais testados para verificar se os elementos do módulo (funções) funcionam em conjunto.</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 elementos integrados em ambiente relevante, de ponta a ponta		<p>Funcionalidade de ponta a ponta da integração de sistemas foi validada.</p> <p>Testes de transmissão de dados concluídos com sucesso.</p>
7	Demonstração da integração através de protótipo de sistema em ambiente operacional de alta fidelidade		<p>Protótipo totalmente integrado foi demonstrado com sucesso em ambiente operacional real ou simulado.</p> <p>Cada interface de sistema/software testada individualmente sob condições estressadas e anômalas.</p>

IRL	Definição atual	Ilustração	Evidências necessárias
			Verificação de interfaces, dados e funcional concluída.
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>Interfaces do sistema qualificadas e funcionando corretamente em um ambiente operacional.</p>
9	Integração de sistema comprovado através de missão bem-sucedida	 <p>Proven</p>	<p>Sistema totalmente integrado demonstrou eficácia operacional e adequação no seu ambiente operacional pretendido ou representativo.</p> <p>O desempenho de integração foi totalmente caracterizado e é consistente com os requisitos de usuário.</p>

Fonte: Adaptado de Austin e York (2015, 2016).