



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.03.15.55-TDI

## UM MODELO DE AVALIAÇÃO DE RISCO PARA PROJETOS AEROESPACIAIS

Julio Cesar Lemos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Milton de Freitas Chagas Junior, aprovada em 07 de março de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L9LFR8>>

INPE  
São José dos Campos  
2016

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

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

### **Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

### **Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

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

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

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

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

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.03.15.55-TDI

## UM MODELO DE AVALIAÇÃO DE RISCO PARA PROJETOS AEROESPACIAIS

Julio Cesar Lemos

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Milton de Freitas Chagas Junior, aprovada em 07 de março de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L9LFR8>>

INPE  
São José dos Campos  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Lemos, Julio Cesar.

L544m Um modelo de avaliação de risco para projetos aeroespaciais / Julio Cesar Lemos. – São José dos Campos : INPE, 2016.

xxii + 84 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/03.03.15.55-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientador : Dr. Milton de Freitas Chagas Junior.

1. Complexidade. 2. Gestão de risco. 3. Incerteza sistêmica. 4. Tomada de decisão. 5. Nível de maturidade da integração. I.Título.

CDU 629.78:005.334

---



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): **Julio Cesar Lemos**

Título: "UM MODELO DE AVALIAÇÃO DE RISCO PARA PROJETOS AEROESPACIAIS".

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

**Engenharia e Tecnologia  
Espaciais/Gerenciamento de Sistemas  
Espaciais**

Dra. Maria de Fátima Mattiello Francisco

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Milton de Freitas Chagas Junior

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

Dr. Thyrso Villela Neto

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Otávio Luiz Bogossian

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

Dra. Ligia Maria Soto Urbina

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

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(x) unanimidade

São José dos Campos, 07 de Março de 2016



*“A simplicidade é o último grau de sofisticação”.*

*Leonardo da Vinci*





*A meus pais*

*Lourival de Souza Lemos,*

*Eva Aparecida Lemos (in memoriam)*

*e a minha esposa*

*Nelly Cristina de Souza Leite*



## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado graça ao apoio de diversas pessoas com quem tive a felicidade de trabalhar e estudar durante sua realização, gostaria de agradecer sinceramente:

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e à Coordenação de Engenharia e Tecnologias Espaciais (ETE) pela oportunidade de desenvolver este trabalho com o apoio de seus profissionais.

Ao Instituto de Aeronáutica e Espaço pela disponibilidade de realização do estudo do projeto VSB-30 e pela disponibilização de tempo para realização deste trabalho.

Ao Dr. Milton de Freitas Chagas Júnior pela orientação atenciosa e paciente na realização deste trabalho, e pelo amplo conhecimento do qual tive o privilégio de compartilhar.

Aos professores da Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, pelos valiosos ensinamentos que tornaram este trabalho possível.

A meu pai Lourival de Souza Lemos que me ensinou a importância do estudo e o valor do trabalho, servindo de exemplo para minha vida.

A minha mãe Eva Aparecida Lemos (*in memoriam*) que me ensinou a ser gentil com a vida mesmo diante das dificuldades.

A minha esposa Nelly Cristina de Souza Leite pela paciência infinita, pelo amor pleno e o carinho que tornaram agradáveis as longas horas de estudos.

A meus colegas de Irineu dos Santos Yassuda; Naoto Shitara; Alexandre Balistrieri; Dinah Eluze Sales Leite e tantos outros que me acompanharam e incentivaram.

A todos que de alguma forma me ajudaram a alcançar este objetivo.

Por último, mas não menos importante, agradeço a Deus por sua infinita bondade, e por me agraciar com tão preciosas bênçãos.

A todos, meu muito obrigado.



## RESUMO

Sistemas de categorização de projetos surgem como processos organizacionais que estabelecem a ponte entre gerenciamento de portfólios, estabelecendo critérios de seleção de projetos, e gerenciamento de projetos, identificando seus maiores riscos. A complexidade crescente dos projetos aeroespaciais e a demanda por tecnologias inovadoras introduzem um alto nível de incerteza nos projetos. O objetivo desta pesquisa é propor um sistema de categorização de projetos aeroespaciais visando à definição de critérios de seleção de projetos e ao gerenciamento de seus riscos. O modelo de referência, a partir do qual serão propostos refinamentos, avalia o projeto em quatro dimensões: Novidade, Tecnologia, Complexidade e Ritmo (NTPCR). Estes refinamentos visam captar as nuances da complexidade que são relevantes como fontes de riscos em projetos da indústria aeroespacial. A dimensão complexidade do modelo NTPCR faz uma avaliação de nível hierárquico ou de escopo do projeto. No entanto, projetos de um mesmo nível hierárquico podem possuir níveis diversos de complexidade. O modelo refinado, proposto neste trabalho, substitui a dimensão complexidade do modelo NTPCR por uma dimensão baseada em níveis de maturidade de integração (IRL) do sistema considerado no projeto. A escala da dimensão tecnologia passa a representar a maturidade tecnológica (TRL). O produto das dimensões IRL e TRL define uma dimensão associada à maturidade sistêmica (SRL). Esta dissertação sustenta que o SRL introduz uma dimensão representativa do nível de incerteza sistêmica do projeto que está sendo avaliado. Desta forma, além das incertezas tecnológicas e comerciais, previstas originalmente no modelo NTPCR, é possível se avaliar o nível de incerteza sistêmica do projeto. O SRL introduz um caráter dinâmico à avaliação de projetos aeroespaciais, permitindo que se considere o ciclo de vida de produto a partir do modelo *chain-linked*. As métricas do SRL são aplicadas às fases do modelo *chain-linked* como auxílio à tomada de decisão na passagem de fases deste ciclo de vida. Foram realizados dois estudos de caso: o satélite CBERS-2B e o foguete VSB-30. Os resultados do CBERS-2B mostraram os pontos críticos de desenvolvimento que, de fato, foram considerados neste projeto. Os resultados do VSB-30 indicaram a versatilidade do modelo para a identificação de oportunidades de aprendizagem organizacional, derivadas do uso do produto em seu ambiente operacional. Este trabalho proporcionou uma discussão sobre a natureza da complexidade e suas implicações no gerenciamento de riscos. O modelo refinado se mostrou eficaz na avaliação das incertezas de projetos aeroespaciais.

Palavras-chave: Complexidade. Gestão de risco. Incerteza sistêmica. Tomada de decisão. Nível de maturidade da integração. Nível de maturidade do sistema. Inovação tecnológica.



# A RISK ASSESSMENT MODEL FOR AEROSPACE PROJECTS

## ABSTRACT

Project categorization systems emerge as organizational processes that establish the link between portfolio management, establishing project selection criteria and project management, identifying their greatest risks. The growing complexity of aerospace projects and the demand for innovative technologies introduce a high level of uncertainty in projects. The objective of this research is to propose a system of categorization for aerospace projects to the definition of project selection criteria and management of its risks. The reference model, from which refinements are proposed, evaluate the project in four dimensions: novelty, technology, complexity and pace (NTCP). These refinements aim to capture the nuances of complexity that are relevant as risk sources in aerospace projects. The complexity dimension of NTCP model is a hierarchical or project scope assessment. However, projects of the same hierarchical level can have different levels of complexity. The refined model proposed in this work, replaces the complexity dimension of NTCP model by a dimension based on integration maturity levels (IRL) of the system considered in the project. The scale of the technology dimension now represents the technological maturity (TRL). The product of the IRL and TRL dimensions defines a dimension associated with systemic maturity (SRL). This dissertation argues that the SRL introduces a representative dimension of systemic uncertainty of the project being evaluated. Thus, in addition to the technological and commercial uncertainties, originally provided for in NTCR model, it is possible to evaluate the systemic uncertainty of the project. The SRL introduces a dynamic character to the evaluation of aerospace projects, allowing them to consider the product life cycle from the chain-linked model. The SRL metrics are applied to the phases of the chain-linked model as an aid to decision-making in the phase transition of this life cycle. Two case studies were conducted: the CBERS-2B satellite, and the VSB-30 rocket. The results of the CBERS-2B showed the critical points of development that, in fact, were considered in this project. The results of the VSB-30 showed the versatility of the model to identify opportunities for organizational learning, derived from the use of the product in its operating environment. This work provided a discussion of the nature of complexity and its implications for risk management. The refined model has proven effective in the evaluation of aerospace project uncertainties.

Keywords: Complexity. Risk management. Systemic uncertainty. Decision-making. Integration maturity level. System maturity level. Technologic innovation.





## LISTA DE FIGURAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Figura 2.1 – Manifestações da complexidade em sistemas. ....	8
Figura 2.2 – Perfil típico de despesas de um projeto: comprometido versus gasto. ....	13
Figura 2.3 - Representação gráfica do modelo NTCR. ....	18
Figura 2.4 – Abordagem adaptativa do gerenciamento de projetos. ....	20
Figura 2.5 - Modelo NTCR do projeto do orbitador climático de marte ....	21
Figura 2.6 – Modelo Linear da Inovação ....	35
Figura 2.7 – Modelo <i>chain-linked</i> . ....	36
Figura 3.1 - Modelo NTCR do projeto Kepler. ....	38
Figura 3.2 - Modelo NTCR do OBSS ....	39
Figura 3.3 - Modelo NTCR do projeto SOFIA.....	40
Figura 3.4 - Modelo NTCR do projeto ST-5.....	41
Figura 3.5 – Modelo NTCR refinado.....	43
Figura 6.1 – Modelo <i>chain-linked</i> incluindo as restrições no nível de maturidade. .....	66
Figura 6.2 – Relação entre SRL e os estágios do processo de inovação .....	67
Figura 6.3 – Comparação entre o modelo <i>chain-linked</i> e a abordagem adaptativa.....	73



## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 2.1 – Escala TRL do Departamento de Defesa dos EUA.....	23
Tabela 2.2 - Escala de maturidade de integração (IRL).....	25
Tabela 2.3 – Níveis de maturidade de sistemas.....	29
Tabela 4.1 – Valores de TRL para os subsistemas do projeto CBERS-2B.....	51
Tabela 4.2 – Valores de IRL para o CBERS-2B.....	52
Tabela 4.3 – Valores de SRL para o projeto CBERS-2B. ....	55
Tabela 5.1 – Níveis de maturidade tecnológica dos subsistemas do foguete VSB-30.....	58
Tabela 5.2 – Valores de IRL para o foguete VSB-30. ....	60
Tabela 5.3 - Valores de IRL para o foguete VSB-30. ....	61



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AOCS	Do inglês: <i>Attitude and Orbit Control System</i> – Sistema de Controle de Atitude e Órbita
CBERS	Do inglês: <i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i> – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CCD	Do inglês: <i>Charged Coupled Device</i> – Dispositivo de Carga Acoplada
CCD DT	Do inglês: <i>Charged Coupled Device Data Transmitter</i> – Transmissor de Dados do Dispositivo de Carga Acoplada
DCS	Do inglês: <i>Data Collecting Subsystem</i> – Subsistema de Coleta de Dados
DDR	Do inglês: <i>Digital Data Recorder</i> – Gravador de Dados Digitais
DLR	Do alemão: <i>Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt</i> – Centro Aeroespacial Alemão
DoD	Do inglês: <i>Department of Defense</i> – Departamento de Defesa
EARTO	Do inglês: <i>European Association of Research and Technology Organizations</i> – Associação Européia das Organizações de Pesquisa e Tecnologia
GAO	Do inglês: <i>Government Accountability Office</i> – Escritório de Contabilidade Governamental
GPS	Do inglês: <i>Global Positioning System</i> – Sistema de Posicionamento Global
HRC	Do inglês: <i>High Resolution Camera</i> – Câmera de Alta Resolução
HRC DT	Do inglês: <i>High Resolution Camera Data Transmitter</i> – Transmissor de Dados da Câmera de Alta Resolução
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IEM	Interferência Eletromagnética
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	Do inglês: <i>International Standardization Organization</i> – Organização Internacional para Padronização
IRL	Do inglês: <i>Integration Readiness Level</i> – Nível de Maturidade de Integração
MECB	Missão Espacial Completa Brasileira
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
NTCR	Novidade, Tecnologia, Complexidade e Ritmo (modelo diamante)

OBDH	Do inglês: <i>On Board Data Handling</i> – Processamento de Dados Embarcado
OBSS	Do inglês: <i>Orbiter Boom Sensor System</i> – Sistema de Sensores Orbital em Lança
PBO	Do inglês: <i>Project Based Organization</i> – Organização Baseada em Projetos
PDR	Do inglês: <i>Preliminary Design Review</i> – Revisão Preliminar de Projeto
PMBok	Do inglês: <i>Project Management Base of Knowledge</i> – Base de Conhecimento de Gerenciamento de Projetos
PMI	Do inglês: <i>Project Management Institute</i> – Instituto de Gerenciamento de Projetos
SCR	Do inglês: <i>System Concept Review</i> – Revisão de Conceito de Sistema
SEM	Do inglês: <i>Space Environment Monitor</i> – Monitor do Ambiente Espacial
SIR	Sistema de Indução de Rolamento
SOFIA	Do inglês: <i>Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy</i> – Observatório Estratosférico para Astronomia Infravermelha
SRL	Do inglês: <i>System Readiness Level</i> – Nível da Maturidade Sistêmica
ST-5	Do inglês: <i>Space Technology 5</i> – Tecnologia Espacial 5
TRL	Do inglês: <i>Technology Readiness Level</i> – Níveis de Maturidade Tecnológica
VS -30	Veículo de Sondagem
VSB-30	Veículo de Sondagem com Booster
WFI	Do inglês: <i>Wide Field Imager</i> – Imageador de amplo campo

## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo geral.....	4
1.1.1. Objetivos específicos .....	4
1.2. Delimitação da pesquisa.....	4
1.3. Abordagem metodológica .....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	7
2.1. Complexidade e Sistemas complexos .....	7
2.2. Riscos do projeto .....	10
2.3. Modelos de Categorização de Projetos .....	13
2.3.1. Modelo NTCR.....	14
2.3.1.1. Novidade .....	14
2.3.1.2. Tecnologia.....	15
2.3.1.3. Complexidade .....	16
2.3.1.4. Ritmo.....	17
2.3.1.5. Avaliação do modelo NTCR .....	18
2.3.1.6. Abordagem adaptativa .....	19
2.3.1.7. Exemplo de aplicação do modelo NTCR.....	20
2.4. Avaliação de maturidade tecnológica .....	22
2.4.1. Maturidade Sistêmica.....	27
2.5. Teoria da Contingência.....	29
2.5.1. Integração e Diferenciação.....	30
2.5.2. Organização baseada em projetos.....	32
2.6. Aprendizagem pelo uso .....	33
3 DESENVOLVIMENTO .....	37
3.1. Limitações da dimensão complexidade do modelo NTCR.....	37
3.2. Proposta .....	42
3.3. Metodologia .....	43
4 ESTUDO DE CASO: PROJETO CBERS 2B .....	47

4.1. Identificação da Arquitetura do CBERS-2B .....	48
4.2. Critérios de Avaliação de TRL e Resultados .....	49
4.3. Critérios de Avaliação de IRL e Resultados.....	51
4.3.1. Avaliação de IRL da Câmera HRC.....	53
4.3.2. Avaliação de IRL do HRC-DT.....	53
4.3.3. Avaliação de IRL do DDR.....	54
4.4. Cálculo da maturidade sistêmica total .....	55
5 ESTUDO DE CASO: PROJETO VSB-30.....	57
5.1. Identificação da arquitetura do foguete VSB-30.....	57
5.2. Critérios de Avaliação de TRL e Resultados .....	57
5.3. Critérios de Avaliação de IRL e Resultados.....	59
5.4. Calculo da maturidade sistêmica total .....	61
6 DISCUSSÃO.....	63
6.1. Críticas às metodologias TRL/IRL/SRL .....	69
6.2. Crítica à abordagem adaptativa .....	72
7 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77



## 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de projetos tem como questão central a busca pela melhor forma de se organizar para desenvolver um projeto bem-sucedido. Uma forma de abordar esta questão é buscar entender quais características de um projeto são relevantes para o gerenciamento de projetos (CRAWFORD; CABANIS-BREWING, 2014).

Projetos de sistemas aeroespaciais, em geral, possuem uma grande quantidade de características, não somente aquelas derivadas das leis naturais e dimensões mensuráveis, mas também variáveis abstratas como, por exemplo, as características gerenciais e as inter-relações entre as áreas envolvidas no desenvolvimento do projeto. Além disso, as características de um projeto aeroespacial são dinâmicas e sujeitas a mudanças contínuas (GABBAI, 2005).

Não é possível, portanto, gerenciar esta grande quantidade de variáveis simultaneamente durante todo o desenvolvimento do projeto. As características que permanecem desconhecidas introduzem incertezas no projeto (STERMAN, 1992).

Em um ambiente incerto não é possível prever todas as potenciais situações que possam afetar o projeto ao longo de seu desenvolvimento, também chamadas de risco. Então é necessária a utilização de ferramentas que tenham um escopo definido para avaliação de um sistema ou projeto (ZANDI, 2000).

A utilização deste tipo de ferramenta permite que o projeto satisfaça seus requisitos com um esforço mínimo, pois desconsidera características pouco relevantes para realçar as características principais (SIMON, 1978). Ferramentas de gerenciamento de risco vem sendo desenvolvidas para identificação dos eventos que possam influenciar positiva ou negativamente os requisitos do projeto (LOCH *et al.*, 2006).

O modelo diamante de avaliação de risco é uma ferramenta adaptável que delimita o escopo de avaliação de um projeto em quatro dimensões: Inovação, Tecnologia, Complexidade e Ritmo.

O modelo diamante foi desenvolvido baseado em um grande número de estudos de casos em diversos setores, incluindo projetos de infraestrutura, projetos de bens de consumo, sistemas militares, entre outros (SHENHAR; DVIR, 2010). O modelo é abrangente, porém, em aplicações específicas a relevância de suas dimensões é limitada.

Neste trabalho o modelo diamante foi refinado para utilização como ferramenta de avaliação de risco pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) e pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) ou por outras organizações envolvidas em desenvolvimento de sistemas aeroespaciais no Brasil. O refinamento realizado neste trabalho contribuirá para identificar as características relevantes dos projetos aeroespaciais, auxiliando o gerente de projeto na estruturação da organização para realização do mesmo.

O refinamento realizado neste trabalho explora as limitações da dimensão “complexidade” apontadas por Chagas Junior e Sato (2013). A definição de complexidade utilizada no trabalho de Shenhar e Dvir (2010) não está refletida na escala hierárquica proposta nesta dimensão do modelo NTCR (Novidade, Tecnologia, Complexidade e Ritmo).

A complexidade não é uma propriedade inerente de um sistema e sim um fenômeno que se manifesta de diversas formas, e que só pode ser avaliada de forma relativa, ou seja, comparando um sistema com outros sistemas, mais ou menos complexos que o sistema avaliado (SIMON, 1996).

Utilizando como exemplo 4 estudos de caso realizados por Shenhar e Dvir (2010), é possível perceber que projetos aeroespaciais em geral são classificados hierarquicamente como “sistemas”: o Observatório Espacial Kepler; uma extensão do braço robótico do ônibus espacial; um telescópio

embarcado em uma aeronave e uma constelação de microssatélites foram avaliados como sendo igualmente complexos, segundo o modelo NTCR.

Além de a complexidade apresentar variações dentro de um mesmo nível hierárquico, sistemas aeroespaciais possuem requisitos vindos de sua interação com outros sistemas. Então, projetos aeroespaciais possuem complexidade referente ao seu nível hierárquico, e ao nível hierárquico superior.

Essa constatação surge do fato de que sistemas complexos necessitam interagir com outros sistemas para completar sua missão. Os 4 estudos de caso citados dependem de veículos, infraestrutura de lançamento, telemetria e telecomandos do segmento de solo, entre outros sistemas para funcionarem adequadamente em seu ambiente operacional.

Sendo assim, a avaliação de escopo como proposto por Shenhar e Dvir (2010) faz sentido para bens de produção em massa, mas não é relevante para produtos e sistemas complexos (CoPS) segundo proposto por Hobday (1998).

Buscando avaliar as características relevantes da complexidade em projetos aeroespaciais, foi adotada uma dimensão baseada em níveis de maturidade de integração (IRL- Integration Readiness Level).

Também foi alterada a escala da dimensão “tecnologia” para representar a maturidade tecnológica (TRL – Technology Readiness Level). Esta alteração segue sugestões feitas por Shenhar et al. (2005) elaborada para a NASA.

Do produto destas duas dimensões modificadas (TRL e IRL), define-se uma dimensão associada à maturidade sistêmica (SRL – System Readiness Level).

A avaliação das dimensões modificadas foi aplicada no projeto do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres 2B (CBERS-2B), desenvolvimento conjunto do INPE com a CAST, e no Veículo de Sondagem com Booster (VSB-30), desenvolvimento conjunto do IAE com o DLR.

Estas aplicações permitiram relacionar o SRL às fases do ciclo de vida presentes no modelo *chain-linked*, indicando que a avaliação de maturidade é capaz de auxiliar os processos de tomada de decisão de passagens de fase do ciclo de vida e na identificação dos fluxos de aprendizado da organização.

### 1.1. Objetivo geral

Desenvolver um modelo de avaliação de risco de projeto adequado à realidade do INPE e do IAE.

#### 1.1.1. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram necessários realizar os seguintes objetivos específicos:

- Substituir a escala hierárquica da dimensão “complexidade” no modelo diamante, por uma escala baseada em maturidade de integração;
- Retornar à utilização da maturidade tecnológica como escala da dimensão “tecnologia”;
- Aplicar a avaliação de maturidade no projeto do satélite CBERS-2B;
- Aplicar a avaliação de maturidade no foguete VSB-30;
- Demonstrar que a avaliação de maturidade e o modelo diamante estão em conformidade com o modelo da inovação *chain linked*.

### 1.2. Delimitação da pesquisa

Esta pesquisa não pretende modificar as dimensões “inovação” e “ritmo” do modelo diamante. Estas dimensões não foram avaliadas nas aplicações do modelo refinado.

Esta pesquisa não irá tratar de questões relativas a domínio de uso e domínio próprio das tecnologias. Os estudos de caso levam em conta a capacitação das

organizações baseadas em projeto, e não da capacitação dos institutos isoladamente.

### **1.3. Abordagem metodológica**

A pesquisa apresentada neste trabalho é de natureza qualitativa, com objetivo exploratório. O método de pesquisa foi o abdução por meio de estudo de casos múltiplos *ex-post facto*. Os estudos de caso foram realizados por meio de reuniões com especialistas, pesquisa bibliográfica, e leitura de relatórios internos.

Esta pesquisa foi realizada no INPE e no IAE.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados os conceitos teóricos utilizados na elaboração deste trabalho; no Capítulo 3 é apresentada a proposta da pesquisa e a metodologia aplicada na construção do modelo; nos Capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados dos estudos de caso; no Capítulo 6 os resultados são discutidos e no Capítulo 7 as conclusões são apresentadas.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Esta seção apresentará os conceitos teóricos adotados neste trabalho.

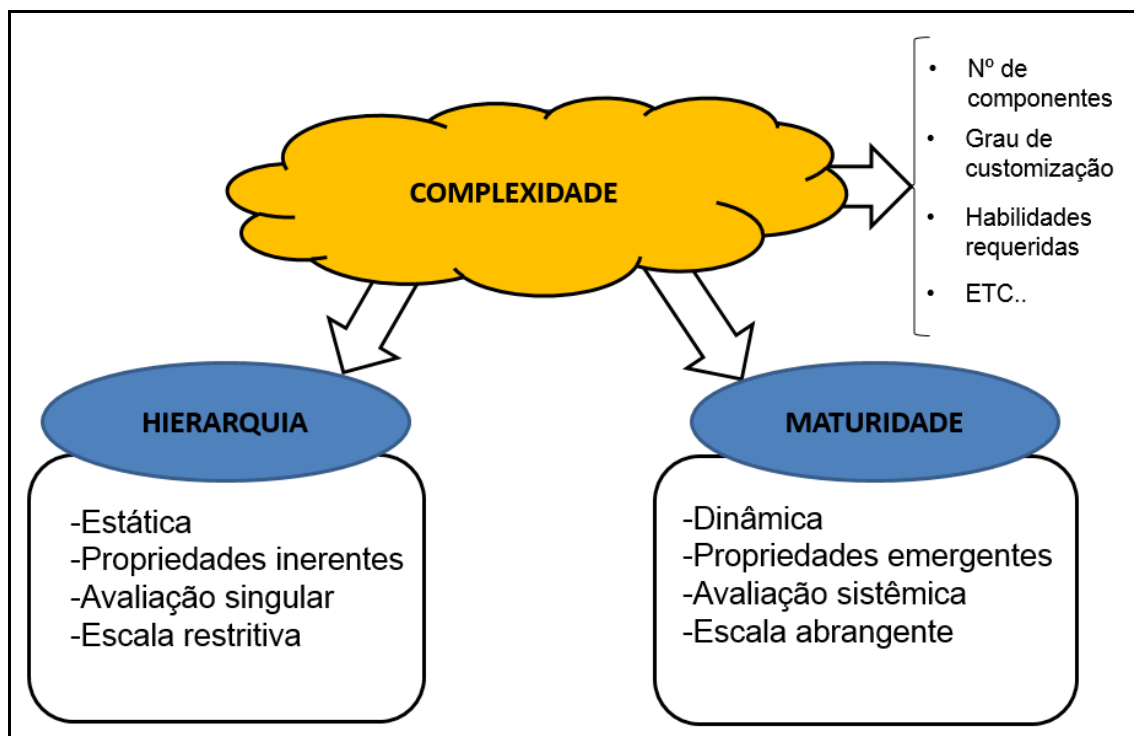
### **2.1. Complexidade e Sistemas complexos**

Para o estudo de sistemas complexos de engenharia, é possível adotar algumas definições. Duas definições são as bases da discussão da complexidade deste trabalho.

A primeira definição é que a complexidade não é uma característica de um sistema, e sim um fenômeno universal que se manifesta de diferentes maneiras e intensidades. A segunda definição é que a complexidade é relativa. Um sistema não é mais ou menos complexo por si só. Só é possível avaliar a complexidade de um sistema comparando com outros sistemas (SIMON, 1996).

A primeira definição é ilustrada na Figura 2.1. Duas manifestações da complexidade que serão confrontadas neste trabalho são a hierarquia e a maturidade.

Figura 2.1 – Manifestações da complexidade em sistemas.



Fonte: Produção do autor

A hierarquia ou escopo de um sistema está relacionada com a posição do objeto a ser avaliado na decomposição analítica do sistema. O nível hierárquico é uma propriedade inerente de um objeto de avaliação e não está sujeito a mudanças. A hierarquia pode ser avaliada em níveis de abstração definidos e pontuais (BOULDING, 1956).

Já a maturidade sistêmica leva em conta propriedades emergentes de um sistema. A maturidade evolui ao longo do tempo. Ela pode ser medida em uma escala contínua tão abrangente quanto for necessário.

Bar-Yam (2003) aponta que tanto um sistema simples quanto um sistema complexo são compostos por partes. O que diferencia estes sistemas são os relacionamentos entre suas partes. Para se descrever um sistema complexo é preciso entender suas partes, e para descrever suas partes é necessário entender sua relação com o restante do sistema.



A interdependência é, portanto, uma manifestação da complexidade em um sistema. Bar-Yam (2009) define que, em um sistema simples, a retirada de qualquer uma de suas partes não traz efeitos nas propriedades do sistema ou da parte. E cita o exemplo de um metal ou um líquido, retirar uma parte destes materiais não afeta as características da parte retirada ou do todo restante.

O autor prossegue usando como exemplo uma planta: retirar um galho ou um pedaço de sua raiz afetará muito pouco a forma como a planta continua a crescer, no entanto a parte retirada será fortemente afetada e provavelmente morrerá.

Por último, o autor cita o exemplo de um animal, remover um órgão de um animal pode causar efeitos catastróficos tanto no órgão retirado quanto no animal.

Estes exemplos demonstram uma característica de um sistema complexo, o alto nível de acoplamento entre seus componentes. Esta característica é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Outra manifestação da complexidade importante neste trabalho é o dinamismo. As características de um sistema complexo não são estáticas, sua formação e operação evoluem em escalas de tempo próprias (BAR-YAM, 2003).

A complexidade pode possuir diversas outras manifestações em um sistema, como, por exemplo: grau de customização ou variabilidade do sistema, demandas ambientais, capacitações necessárias, funções e seus objetivos, entre outras (HOBDA, 1998; BAR-YAM, 2003).

Hobday *et al.* (2000) fornece uma definição ainda mais específica: “produtos ou sistemas complexos são o subconjunto de bens de capital de alta tecnologia que permitem o fornecimento de serviços e fabricação, o alicerce da economia moderna”.

Portanto um sistema aeroespacial pode ser considerado um sistema complexo. Diversas manifestações da complexidade estão presentes em um projeto aeroespacial: grande número de componentes diferentes; forte interdependência entre os componentes; requisitos ambientais significativos; diversas capacitações necessárias; etc. (GABBAI, 2005).

Já na segunda definição de complexidade apresentada Simon (1996) afirma que todos os sistemas podem ser complexos ou simples, dependendo da forma como eles são descritos, logo é necessário encontrar a descrição certa do sistema.

Não existe uma definição única de complexidade, no entanto é possível definir a ciência da complexidade como o “estudo dos fenômenos que emergem de uma coleção de objetos interagindo” (JOHNSON, 2009). Esta definição vai ao encontro da definição de complexidade de Hobday (1998) e Hobday *et al.* (2000), onde a complexidade está associada ao nível de interação entre os componentes de um sistema, ou o nível de acoplamento entre os seus componentes.

A maturidade permite unir estas duas definições de complexidade, pois incorpora a interdependência, o dinamismo, os conceitos de nível de acoplamento e a comparação objetiva de nível de complexidade entre sistemas.

## **2.2. Riscos do projeto**

A definição comum de risco de um projeto é um evento capaz de interferir nos requisitos do projeto. Riscos têm causas e, caso o evento ocorra, consequências (SHENHAR; DVIR, 2010).

Gerenciamento de risco é o processo organizacional que busca aumentar a probabilidade e as consequências de eventos positivos e reduzir a

probabilidade e as consequências de eventos negativos (SHENHAR; DVIR, 2010).

Ferramentas de gerenciamento de riscos vêm sendo desenvolvidas com a intenção de identificar os possíveis eventos e avaliar seu impacto (positivo ou negativo) a partir dos planos do projeto (LOCH *et al.*, 2006).

Projetos de inovação envolvem uma grande quantidade de aspectos desconhecidos e são complexos por natureza, tornando as ferramentas tradicionais de gerenciamento de risco inaplicáveis, uma vez que os projetos de inovação não possuem planos detalhados, e riscos importantes ainda são desconhecidos (LOCH *et al.*, 2006).

A diferença entre risco e incerteza possui diversas interpretações na bibliografia (ANDRADE, 2011). Knight (1921) define incerteza como um risco incalculável. Esta visão é compartilhada por Shenhar e Dvir (2010) que traduzem incerteza para a disciplina de gerenciamento de projetos como os eventos (ou riscos) impossíveis de prever. A abordagem de Shenhar e Dvir (2010) propõe uma relação quantitativa entre risco e incerteza, quanto maiores as incertezas identificadas maior será o risco do projeto.

O conceito de sucesso é comumente relacionado ao produto final do processo de inovação, ou à capacidade do produto final atender às restrições de escopo, tempo e custo.

As restrições de escopo, tempo e custo foram apresentadas pelo PMBOK (*A guide to the Project Management Base of Knowledge – Um Guia para a Base de Conhecimento em Gerenciamento de Projetos*) em sua terceira edição (PMI, 2004) e é conhecido como tripla restrição.

Porém, gerenciar um projeto tendo a restrição tripla como base, nem sempre leva a organização a projetos bem-sucedidos:

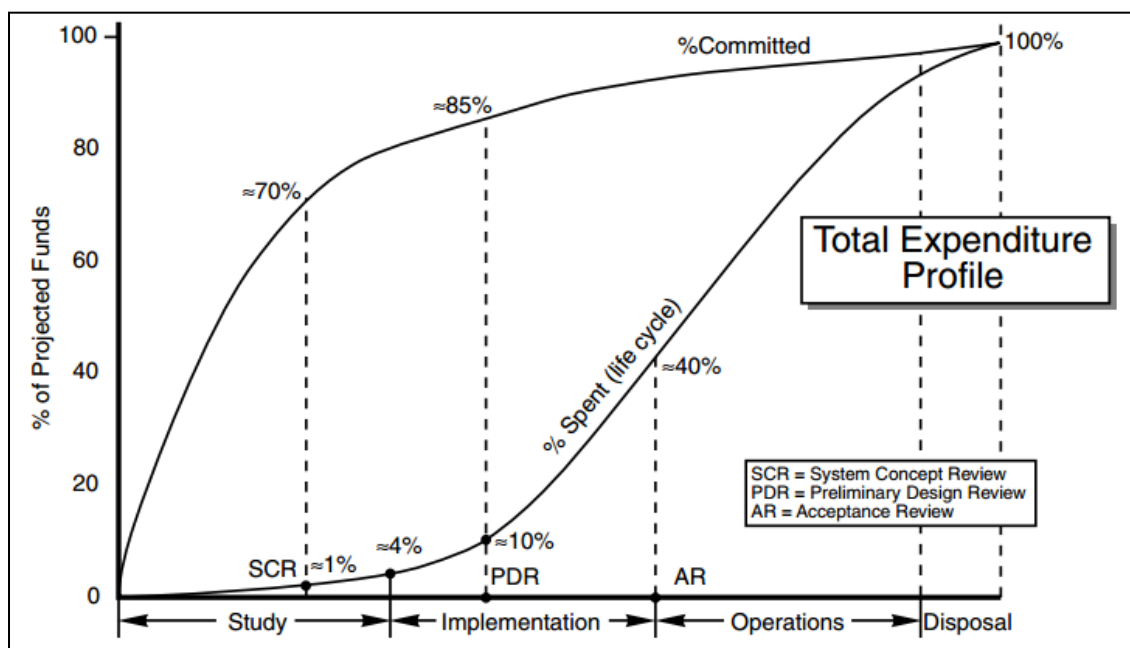
O modelo tradicional se encaixa apenas em um grupo pequeno de projetos dos dias de hoje. A maioria dos projetos modernos é incerta, complexa e mutável, e é bastante afetada pelas dinâmicas do ambiente, da tecnologia e dos mercados (SHENHAR; DVIR, 2010, pág. 22).

Essa constatação expõe a necessidade de uma nova abordagem adaptativa do gerenciamento, e levou o PMI a modificar as definições de sucesso em suas edições seguintes do PMBOK, que em sua quarta edição passa a definir seis restrições: escopo; qualidade; cronograma; orçamento; recursos e risco (PMI, 2008), estas novas restrições substituíram a restrição tripla considerada anteriormente.

As novas restrições indicam a importância do gerenciamento de riscos para o sucesso da organização. Um conhecimento precoce dos riscos e incertezas envolvidos em um projeto podem evitar fracassos financeiros (FORSBERG *et al.*, 2005).

A Figura 2.2 apresenta um perfil de despesas de um projeto típico. No estágio de revisão do conceito do projeto (SCR – *System Concept Review*), por exemplo, um projeto típico terá despendido cerca de 1% de seus recursos, porém estarão comprometidos cerca de 70% do orçamento. No estágio de revisão preliminar de projeto (PDR – *Preliminary Design Review*), aproximadamente 10% dos recursos já terão sido usados, e 85% dos recursos já estarão comprometidos. Isso indica que a necessidade de mudanças na arquitetura representam um risco crescente ao longo do projeto, pois o orçamento disponível para grandes mudanças e desenvolvimentos adicionais diminui rapidamente (FORSBERG *et al.*, 2005).

Figura 2.2 – Perfil típico de despesas de um projeto: comprometido versus gasto.



Fonte: Forsberg *et al.* (2005).

### 2.3. Modelos de Categorização de Projetos

Criar esquemas de classificação nos permite organizar nosso conhecimento sobre algo e tornar este conhecimento útil (KWASNIK, 1992).

Para entendimento do conceito de modelos de categorização, utilizamos algumas definições do dicionário: categorização é definida como o ato de categorizar algo; categorizar significa dispor em categorias; categoria é um conjunto de itens de mesma natureza; e classificação pode ser definida como o ato de atribuir valores a algo, ou o ato de dispor uma série de itens em ordem (FERREIRA *et al.*, 2009).

Um modelo de categorização é uma ferramenta capaz de distinguir as variáveis associadas às fontes de riscos presentes em projetos. A partir destas variáveis o modelo adota uma série de categorias pelas quais os projetos podem ser classificados (CRAWFORD *et al.*, 2005).

A utilização de um modelo de categorização como ferramenta de gerenciamento de projetos auxilia na busca pela melhor forma de se organizá-los, pois amplia o entendimento das particularidades do projeto, e permite comparações objetivas entre projetos similares (CRAWFORD *et al.*, 2005).

### **2.3.1. Modelo NTCR**

Shenhar e Dvir (2010) estudaram mais de seiscentos projetos na busca pelas principais variáveis que representam os riscos para o sucesso de um projeto. O resultado desta pesquisa revelou quatro categorias, denominadas neste modelo “dimensões”. As dimensões do modelo são as seguintes: Novidade; Tecnologia; Complexidade e Ritmo (NTCR).

O modelo NTCR, também conhecido como modelo diamante, avalia um projeto nas quatro dimensões. Cada dimensão possui uma escala de classificação descritiva que representa de forma crescente a incerteza naquela dimensão, e conseqüentemente, maiores riscos para o projeto como um todo (SHENHAR; DVIR, 2010).

Nos sub-tópicos a seguir estas dimensões são apresentadas conforme Shenhar e Dvir (2010).

#### **2.3.1.1. Novidade**

Na dimensão novidade, avalia-se o nível de inovação que o projeto representa potencialmente para o mercado, são considerados três níveis de classificação:

- a) derivativo – se trata de um projeto que agrega somente melhorias ou extensões a produtos existentes, por exemplo, acrescentar uma segunda câmera frontal em um celular. Em geral representam projetos rápidos e baratos com baixos níveis de risco, pois o modelo anterior do produto já está estabelecido no mercado;

- b) plataforma – projetos classificados como plataforma criam novas famílias de produtos. Neste tipo de projeto, o mercado já está estabelecido. O produto pode incluir novas tecnologias, porém o uso pelo consumidor é previsível. Um exemplo de projeto de plataforma é um novo modelo de automóvel. Um projeto de plataforma pode originar diversos projetos derivativos;
- c) inovação (ou projetos de ruptura) - Esse tipo de projeto representa uma inovação radical, um produto que ainda não é conhecido pelo mercado. Um exemplo de inovação são os exoesqueletos para aplicações médicas ou militares. Em um projeto de inovação não se sabe o que esperar do mercado. Porém pode-se notar que geralmente projetos de inovação bem-sucedidos se tornam o padrão industrial pelo qual novas plataformas surgem.

### **2.3.1.2. Tecnologia**

A dimensão tecnologia representa a incerteza tecnológica e está diretamente associada à maturidade das tecnologias utilizadas no projeto. Neste modelo podemos classificar o projeto em quatro níveis:

- a) baixa tecnologia – projetos que utilizam somente tecnologias maduras e bem estabelecidas. Essas tecnologias são de fácil acesso. Um exemplo de projetos de baixa tecnologia é um projeto de engenharia civil tradicional;
- b) média tecnologia – neste nível, os projetos podem possuir tecnologias imaturas, porém, estas não são tecnologias chave para o sucesso do produto. Aqui podemos incluir, por exemplo, o projeto de um automóvel que possua um acessório inovador, ou a inclusão de uma nova funcionalidade em um aparelho eletrônico. São os projetos mais comuns no meio industrial;

- c) alta tecnologia – projetos classificados como de alta tecnologia são os que possuem tecnologias imaturas em funcionalidades chave do projeto. São projetos geralmente desenvolvidos na área de defesa ou espacial e normalmente levam a produtos antes inexistentes;
- d) super-alta tecnologia – neste nível, os projetos dependem de tecnologias inexistentes. Alguma funcionalidade exigida no projeto não possui solução disponível. Este tipo de projeto geralmente é desenvolvido por grandes instituições ou agências governamentais, possui riscos elevados e depende de pesquisa científica básica. Este tipo de projeto, porém, não está necessariamente confinado no ambiente de pesquisa e desenvolvimento. O projeto pode possuir missão e clientes claramente definidos e ainda assim depender de soluções tecnológicas inexistentes no início do projeto.

### **2.3.1.3. Complexidade**

A dimensão complexidade classifica o projeto conforme a amplitude de seu escopo, está relacionada diretamente ao produto do projeto e está dividida em três níveis:

- a) montagem – são projetos de uma parte componente de um sistema que possui função distinta, como, por exemplo, uma câmera que será usada em um satélite. Normalmente projetos de montagens são realizados por uma equipe ou unidade funcional com comunicação intensa e pouco formal;
- b) sistema – são os projetos de um produto ou sistema completo e integração de todas as suas funcionalidade, como o projeto de uma aeronave ou um lançador de satélites. Projetos de sistemas dependem de uma organização complexa para serem realizados;



- c) matriz de sistemas – Projeto de matrizes ou programas são projetos que lidam com diversos sistemas interagindo para alcançar um objetivo comum. Estes projetos são realizados por uma organização ampla e espalhada geograficamente, que demanda comunicação mais formal com uma organização superior gerenciando todas as equipes e unidades. Um exemplo de projeto de matriz é a Missão Espacial Completa Brasileira (MECB).

#### **2.3.1.4. Ritmo**

A dimensão ritmo capta as incertezas derivadas dos requisitos temporais do projeto. Quanto maior a urgência, maiores serão as incertezas. Esta dimensão possui quatro níveis em sua escala:

- a) regular – são os projetos que permitem atrasos ou repactuação de prazos sem comprometer os requisitos principais do projeto. Eventualmente estes projetos podem ser interrompidos para priorização de projetos mais urgentes;
- b) rápido ou competitivo – estes projetos não têm o prazo como um requisito essencial, o atraso em suas entregas não significa necessariamente o fracasso organizacional. Contudo, o cumprimento do prazo ou uma antecipação de sua conclusão podem representar um diferencial competitivo e uma garantia de participação de mercado. Este tipo de projeto ocorre com frequência no meio industrial, onde é muito importante o lançamento de uma nova geração de um determinado produto antes de seus concorrentes;
- c) de tempo crítico – projetos de tempo crítico possuem um prazo que faz parte dos requisitos essenciais do projeto. A perda do prazo de conclusão significa que o projeto fracassou. Exemplos são as missões espaciais interplanetárias, que possuem janelas de

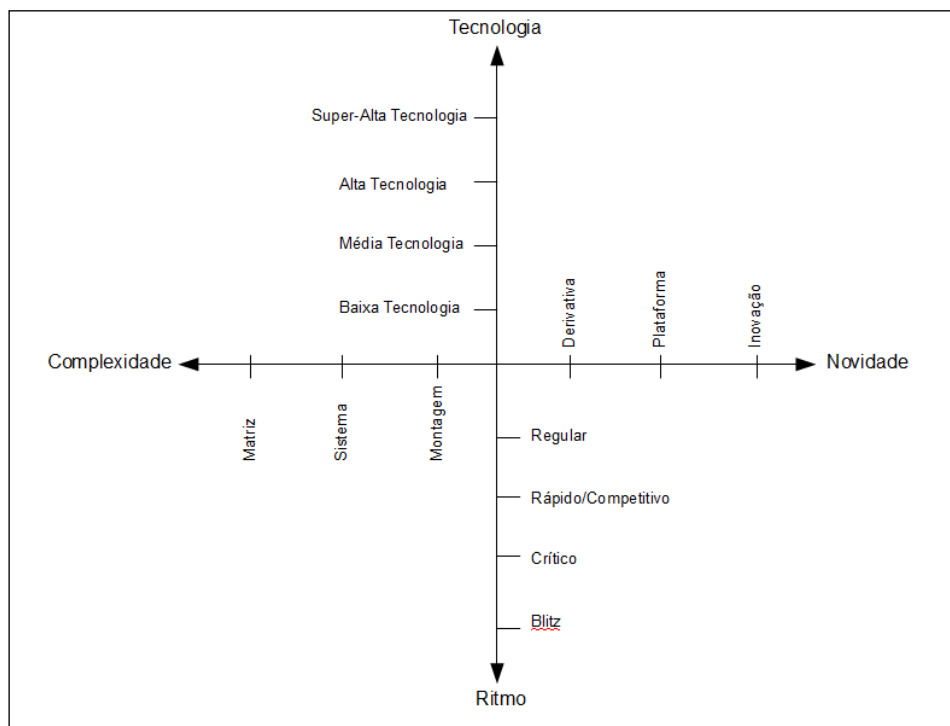
lançamento limitadas. A perda da janela de lançamento significa o fracasso da missão e;

- d) blitz – esta classificação de projetos representa os projetos de redução de perdas. Estes projetos ocorrem quando um evento indesejável já aconteceu. Porém, as perdas se agravam com o tempo, então não existe um prazo a se cumprir. Exemplos são missões de ajuda humanitária em casos de catástrofes, ou solução de problemas com um produto em operação pelo cliente.

### 2.3.1.5. Avaliação do modelo NTCR

O modelo NTCR é representado graficamente por quatro setas partindo de um ponto central indicando cada uma das quatro dimensões, nestas setas são demarcadas as escalas das dimensões. A proximidade com o centro indica uma menor incerteza naquela dimensão, conforme representado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Representação gráfica do modelo NTCR.



Fonte: Shenhar e Dvir (2010)

Após a avaliação de um projeto em cada dimensão do modelo. É traçada a ligação entre os pontos identificados nas escala de cada dimensão. A figura poligonal formada é chamada de “diamante”. A área desta figura representa o risco (ou a oportunidade) associada ao projeto (SHENHAR; DVIR, 2010).

#### **2.3.1.6. Abordagem adaptativa**

A utilização do diamante ao longo das fases de desenvolvimento de um projeto orienta o estilo gerencial adequado para lidar com o risco avaliado. A aplicação desta ferramenta para adaptar o estilo gerencial às características do projeto é chamada de “abordagem adaptativa” (SHENHAR; DVIR, 2010).

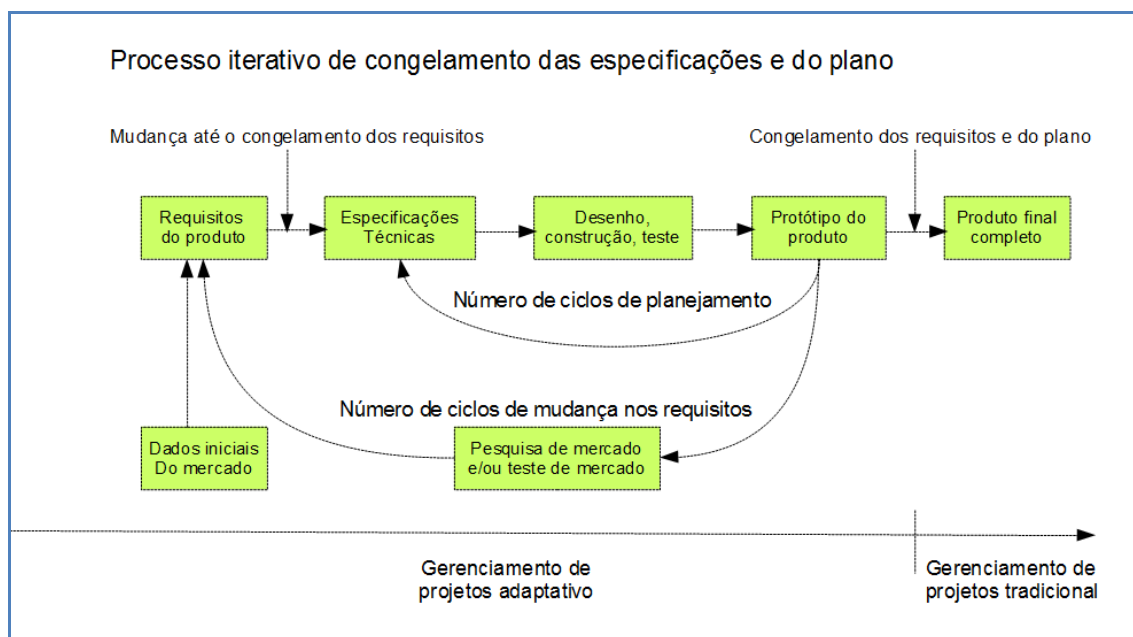
Cada dimensão representa uma característica do estilo gerencial adequado para o projeto:

- a) quanto maior a novidade do projeto, menor o conhecimento da reação do mercado. Então, faz-se necessário um congelamento posterior dos requisitos;
- b) quanto maior nível tecnológico, mais ciclos de planejamento são necessários, pois podem ser exigidos desenvolvimentos tecnológicos tardios. Portanto, o congelamento dos planos deve ser adiado;
- c) maior nível de complexidade aumenta a necessidade de formalidade da estrutura organizacional e;
- d) quanto maior a urgência, maior a necessidade de autonomia das equipes.

Shenhar e Dvir (2010) propõem em sua abordagem adaptativa que uma alta incerteza tecnológica requer mais ciclos de planejamento e testes de design antes de congelar as especificações de um projeto. Da mesma forma, uma alta incerteza de mercado (dimensão inovação) requer mais ciclos de mudança de requisitos e testes de mercado até o congelamento de requisitos.

Este processo iterativo duplo é o elemento mais importante da abordagem adaptativa e deve se repetir até que as decisões finais de planejamento e requisitos sejam tomadas. Esse processo está representado na Figura 2.4 (SHENHAR; DVIR, 2010).

Figura 2.4 – Abordagem adaptativa do gerenciamento de projetos.



Fonte: Shenhar e Dvir (2010)

Shenhar e Dvir (2010) apontam que após o congelamento dos requisitos e dos planos, o gerenciamento adaptativo não é mais necessário. A partir deste ponto é indicado o gerenciamento tradicional baseado na restrição tripla: escopo, tempo e custo.

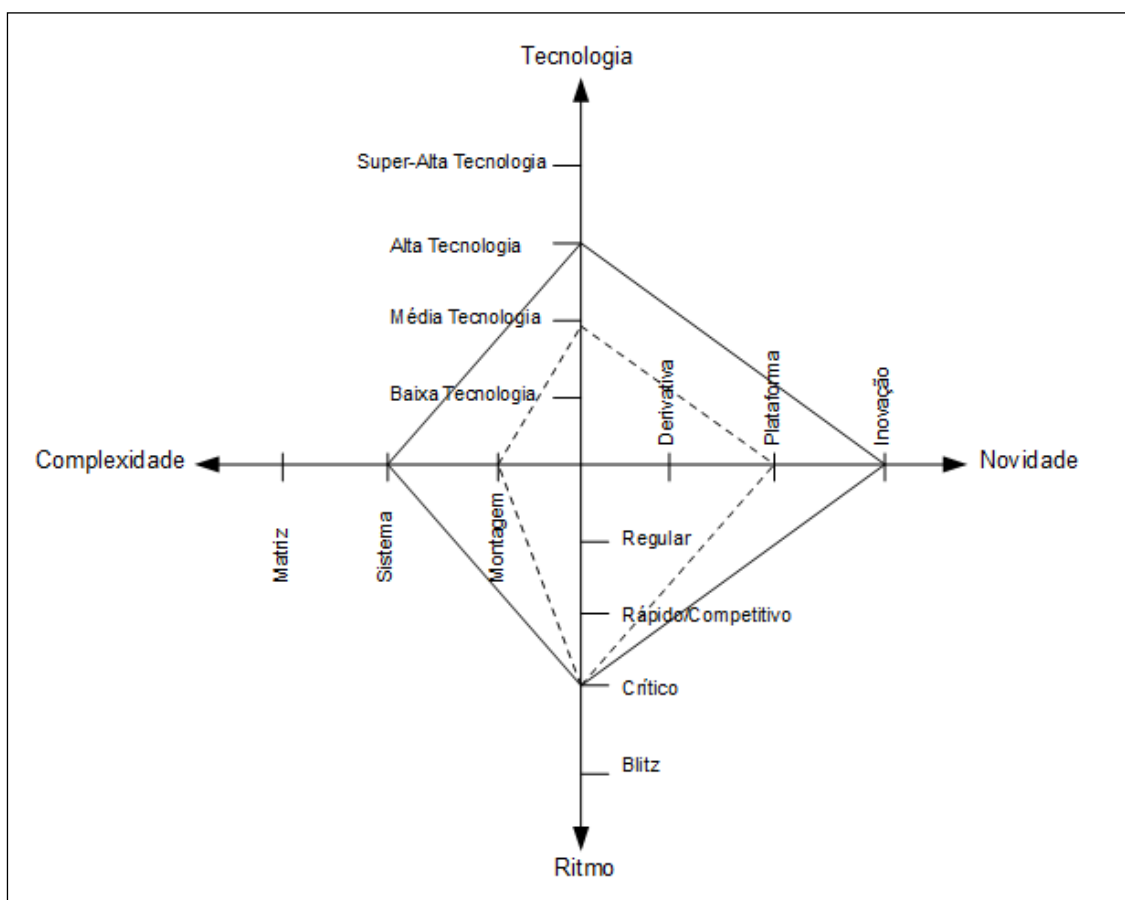
### 2.3.1.7. Exemplo de aplicação do modelo NTCR

Quando aplicamos o modelo NTCR em um projeto em andamento ou finalizado, podemos avaliar a gestão adotada e comparar com a gestão recomendada pelas características do projeto, sendo possível verificar pontos de melhoria.

A Figura 2.5 apresenta a avaliação do projeto do Orbitador Climático de Marte da NASA (*National Aeronautics and Space Administration* – Administração

Nacional de Aeronáutica e Espaço) pelo modelo NTCR. Esta avaliação foi realizada por Shenhar e Dvir (2010). O polígono formado pelas linhas tracejadas representa o estilo de gerenciamento adotado, e a linha contínua as incertezas do projeto e, portanto, o estilo gerencial ideal. É possível observar como este programa foi gerenciado tendo em vista apenas seu prazo inadiável ignorando fontes de incerteza em outras dimensões.

Figura 2.5 - Modelo NTCR do projeto do orbitador climático de marte



Fonte: Shenhar e Dvir (2010), pág. 138

No estudo de caso do Orbitador Climático de Marte, Shenhar e Dvir (2010) contextualizam o período em que o projeto foi desenvolvido. Neste período a NASA havia implementado a iniciativa organizacional denominada: “*faster, better and cheaper*” (mais rápido, melhor e mais barato). Esta iniciativa foi fortemente baseada na tripla restrição (escopo, tempo e custo).

Com o tempo essa iniciativa da NASA se revelou contraproducente. Das 16 missões lançadas neste período, 6 fracassaram, inclusive o Orbitador Climático de Marte.

Este estudo de caso demonstrou os benefícios do modelo NTCR na avaliação de riscos e identificação de potenciais problemas na gestão. Essa demonstração se dá pela comparação entre o diamante ideal e o real (SHENHAR *et al.*, 2005).

#### **2.4. Avaliação de maturidade tecnológica**

A metodologia de avaliação de maturidade tecnológica TRL (*Technology Readiness Level* – Nível de Maturidade Tecnológica) surgiu na NASA como uma ferramenta de avaliação de risco para projetos inovadores (MANKINS, 2009).

Essa metodologia consiste na avaliação individual de cada elemento tecnológico presente no projeto. A avaliação é realizada por meio de uma relação de requisitos a serem preenchidos de forma documental. Essa formalidade na avaliação minimiza o viés do avaliador. Considera-se o nível de maturidade da tecnologia como sendo o mais alto nível que tenha todos seus requisitos atendidos (MANKINS, 2009).

A escala de maturidade utilizada atualmente conta com nove níveis de maturidade. Essa metodologia é altamente adaptável, sendo que diferentes organizações têm escalas próprias.

Uma norma internacional de maturidade tecnológica foi emitida pela Organização Internacional para Padronização (ISO – *International Organization for Standardization*) (ISO, 2013). No entanto, este trabalho utiliza as definições do DoD (*Department of Defense* – Departamento de Defesa) pois é a referência da metodologia de níveis de maturidade sistêmica utilizada.

A metodologia TRL é hoje amplamente aceita e aplicada sendo uma ferramenta essencial na gestão de risco. A metodologia foi recomendada pelo *Government Accountability Office* (GAO) para avaliação de investimentos governamentais em projetos de inovação (GAO, 1999). A escala TRL foi então adotada como referência pelo DoD e sua aplicação é um requisito obrigatório para investimentos em novos projetos (DoD, 2002). Da mesma forma a *European Association of Research and Technology Organizations* (EARTO) e diversas outras organizações utilizam suas próprias escalas adaptadas aos seus contextos. A escala utilizada pelo DoD é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Escala TRL do Departamento de Defesa dos EUA.

<b>TRL</b>	<b>Definição</b>
9	Sistema real comprovado por meio de operação em missão bem sucedida
8	Sistema real completo e qualificado por meio de testes e demonstração
7	Demonstração do protótipo do sistema em um ambiente operacional
6	Demonstração de modelo do sistema/subsistema em ambiente relevante
5	Validação de componente ou protótipo em ambiente relevante
4	Validação de componente ou protótipo em ambiente de laboratório
3	Prova de conceito analítica e experimental de funções críticas e/ou características
2	Conceito tecnológico e/ou aplicação formulada
1	Princípios básicos observados e reportados

Fonte: DoD (2011) (adaptada)

Pelo fato de essa metodologia avaliar as tecnologias individualmente, propriedades emergentes de sistemas não são completamente consideradas por esta análise. Então Sauser *et al.* (2009) propõem uma avaliação de maturidade de integração entre as tecnologias (IRL – Integration Readiness Level) que procura ressaltar a interação entre diferentes elementos tecnológicos de um sistema.

A avaliação de IRL é aplicada em cada par tecnológico presente no sistema. O resultado desta avaliação é disposto em uma matriz simétrica que proporciona a visão de pontos críticos de integração do projeto. Visualizar estes pontos críticos permite priorizar inter-relações que demandam um maior esforço de integração. A avaliação de IRL auxilia na definição de testes de integração e prioridades de desenvolvimento. A escala proposta por Sauser *et al.* (2008) é apresentada na Tabela 2.2 e os níveis são detalhados a seguir.



Tabela 2.2 - Escala de maturidade de integração (IRL).

<b>IRL</b>	<b>Definição</b>
9	Integração foi comprovada em missão por meio de operação em missão bem sucedida
8	A integração real foi completada e qualificada em missão por meio de teste e demonstração no ambiente do sistema
7	A integração entre as tecnologias foi verificada e validada com detalhe suficiente para ser acionável
6	As tecnologias integradas podem aceitar, traduzir e estruturar informações para a aplicação pretendida
5	Há controle suficiente entre as tecnologias para estabelecer, gerenciar e finalizar a integração
4	Há detalhe suficiente na qualidade e garantia da integração entre as tecnologias
3	Há compatibilidade (i.e. linguagem comum) entre as tecnologias para integrar e interagir ordenadamente e eficientemente
2	Há um nível de especificidade para caracterizar a interação (i.e. habilidade de influenciar) entre as tecnologias e suas interfaces
1	Uma interface entre tecnologias foi identificada com detalhes suficientes para permitir caracterização de relacionamento

Fonte: Sauser *et al.* (2008).

- a) O primeiro nível desta escala descreve simplesmente o meio de integração. É o reconhecimento da existência de interface;
- b) No nível 2 é identificada a influência entre os elementos tecnológicos;
- c) No terceiro nível é indicado que as duas tecnologias não só se influenciam mas também se comunicam com dados interpretáveis;

Estes três níveis básicos são chamados de estágio semântico do desenvolvimento da integração, o resultado ao final deste estágio é o diagrama da arquitetura do sistema (SAUSER *et al.*, 2010).

- d) para alcançar o quarto nível da escala, é necessário garantir que os dados enviados são iguais aos dados recebidos, e que existem mecanismos para efetuar esta checagem;
- e) no quinto nível, as tecnologias são capazes de iniciar, gerenciar e finalizar a troca de dados por si só;
- f) o sexto nível é o mais alto nível técnico de integração. Este nível revela que a informação trocada pode ser avaliada, classificada e traduzida para uma linguagem interoperável. A não observação deste nível pode levar a dados mal interpretados ou corrompidos;
- g) o sétimo nível representa um salto significativo em relação ao nível anterior, pois alcançar este nível implica que a integração não somente funciona de uma perspectiva técnica como também atende os requisitos do projeto;

Estes quatro níveis representam o estágio sintático do desenvolvimento da integração (SAUSER *et al.*, 2010).

- h) O oitavo nível representa a demonstração da arquitetura em um sistema completo testado em um ambiente relevante, para a maior parte dos sistemas espaciais este nível é alcançado por meio de um lançamento bem-sucedido de um sistema completo e;
- i) o nono nível só pode ser alcançado se todos os níveis de TRL também alcançarem o nível 9. Esse grau de maturidade indica que a integração dos subsistemas é capaz de operar com sucesso em uma missão real.

Estes dois últimos níveis são chamados de estágio pragmático do desenvolvimento da integração (SAUSER *et al.*, 2010).

#### 2.4.1. Maturidade Sistêmica

De posse dos valores de TRL e IRL de um determinado sistema, é possível então estabelecer uma métrica de maturidade de sistemas (SRL – *System Readiness Level*) em função de TRL e IRL.

O cálculo proposto por Sauser *et al.* (2008) consiste em dispor os valores normalizados de TRL como um vetor  $[TRL]_{n \times 1}$  conforme mostrado na Equação 2.1 na qual os valores  $TRL_1$  até  $TRL_n$  são os valores normalizados de TRL de cada elemento tecnológico.

$$[TRL]_{n \times 1} = \begin{bmatrix} TRL_1 \\ TRL_2 \\ \dots \\ TRL_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Os valores normalizados de IRL são dispostos como uma matriz,  $[IRL]_{n \times n}$ , conforme a Equação 2.2.

$$[IRL]_{n \times n} = \begin{bmatrix} IRL_{11} & IRL_{12} & \dots & IRL_{1n} \\ IRL_{21} & IRL_{22} & \dots & IRL_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ IRL_{n1} & IRL_{n2} & \dots & IRL_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

O produto do vetor  $[TRL]_{n \times 1}$  pela matriz  $[IRL]_{n \times n}$  é o vetor  $[SRL]_{n \times 1}$  conforme mostrado na Equação 2.3.

$$\begin{bmatrix} IRL_{11} & IRL_{12} & \dots & IRL_{1n} \\ IRL_{21} & IRL_{22} & \dots & IRL_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ IRL_{n1} & IRL_{n2} & \dots & IRL_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} TRL_1 \\ TRL_2 \\ \dots \\ TRL_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SRL_1 \\ SRL_2 \\ \dots \\ SRL_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Os elementos do vetor  $[SRL]_{n \times 1}$  representam o nível de maturidade de cada tecnologia em relação ao restante do sistema, o valor máximo destes elementos é o número de tecnologias presentes no sistema. É possível então calcular a maturidade da arquitetura do sistema, SRL, por meio da Equação 2.4:

$$SRL = \frac{\left( \frac{SRL_1}{n_1} + \frac{SRL_2}{n_2} + \dots + \frac{SRL_n}{n_n} \right)}{n} \quad (2.4)$$

em que  $n$  é o número total de elementos tecnológicos;  $SRL_1$  até  $SRL_n$  são os valores do vetor  $[SRL]_{n \times 1}$ ; os valores  $n_1$  até  $n_n$  representam as quantidades de cada elemento tecnológico na arquitetura.

Para uma comparação mais eficaz entre sistemas, Sauser *et al.* (2008) sugerem utilizar valores normalizados.

A Tabela 2.3 apresenta a proposta de correlação entre os valores de SRL normalizados e os estágios do ciclo de vida de um projeto .

Tabela 2.3 – Níveis de maturidade de sistemas.

<b>SRL</b>	<b>Fase do ciclo de vida</b>	<b>Definições</b>
0,90 a 1,00	Operação e suporte	Executar um programa de suporte que atenda requisitos de performance de suporte operacional e mantém o sistema de forma custo-efetiva ao longo do ciclo de vida total.
0,70 a 0,89	Fabricação	Atingir capacidade operacional que satisfaça as necessidades da missão.
0,60 a 0,79	Desenvolvimento de sistema e demonstração	Desenvolver as capacidades ou seus incrementos; reduzir riscos de integração e fabricação; garantir sustentabilidade operacional; reduzir caminhos logísticos; projetar para fabricação; garantir acessibilidade e proteção de informação crítica do programa; e demonstrar a integração, interoperabilidade e utilização segura do sistema
0,40 a 0,59	Desenvolvimento tecnológico	Reduzir riscos tecnológicos e determinar o conjunto adequado de tecnologias para integração em um sistema completo
0,10 a 0,39	Refinamento de conceito	Refinar o conceito inicial; e a estratégia de desenvolvimento de sistema/tecnologia

Fonte: Sauser *et al.* (2008).

## 2.5. Teoria da Contingência

A teoria da contingência é uma teoria comportamental bem estabelecida aplicada à administração que postula: “não existe uma melhor forma de se organizar, nenhuma forma de organização é efetiva em todas as situações” (DONALDSON, 2001).

O estudo da teoria da contingência revela que não é possível estruturar uma organização para que ela funcione bem em qualquer situação. Então a busca pela melhor forma de se organizar se torna a busca por uma forma adequada de se organizar para atender às necessidades de um determinado projeto ou situação (DONALDSON, 2001).

Essa busca depende, inclusive, da identificação das características do mercado em que a organização está inserida. Estas características são chamadas de variáveis ambientais e dependem da classificação dos produtos da organização (LAWRENCE; LORSCH, 1969).

### **2.5.1. Integração e Diferenciação**

O conceito de integração e diferenciação organizacional representa um dos pilares da teoria da contingência. Este conceito foi apresentado por Lawrence e Lorsch (1969). Neste trabalho, os autores realizaram uma comparação entre organizações bem-sucedidas e organizações com dificuldades, observando a interação de suas divisões internas e os fatores derivados do ambiente externo à organização.

O estudo de Lawrence e Lorsch (1969) demonstrou que, mesmo com diferenças notáveis em suas formas de gerenciamento, algumas organizações alcançavam sucesso perceptível em seus ramos de atuação, enquanto outras com estrutura gerencial similar acumulavam fracassos.

Lawrence e Lorsch (1969) notaram que os fatores associados ao nível de sucesso destas organizações vão além de sua capacitação técnica e gerencial. O sucesso dependia muito mais da adequação da estrutura organizacional às peculiaridades de cada mercado.

Lawrence e Lorsch (1969) perceberam que estruturas rígidas e altamente hierarquizadas lidam melhor com mercados estáveis, produtos menos complexos e inovadores. Enquanto estruturas organizacionais mais adaptáveis

e menos hierarquizadas lidam melhor com mercados dinâmicos e projetos inovadores e desafiadores.

Estas observações levaram à percepção de que as variáveis ambientais afetam as características internas de uma organização, e que a capacidade de adaptação da organização a essas variáveis é essencial para o sucesso (LAWRENCE; LORSCH, 1969).

Para este estudo, Lawrence e Lorsch (1969) avaliaram o nível de diferenciação entre as organizações, e definem diferenciação: “By differentiation we mean these differences in attitude and behavior, not just the simple fact of segmentation and specialized knowledge” (Traduzido: “Por diferenciação queremos dizer as diferenças na attitude e comportamento, não o simples fato da segmentação e conhecimento especializado”) (LAWRENCE; LORSCH, 1969, pág. 9). Para avaliar o nível de diferenciação eles identificaram quatro dimensões principais:

- a) orientação dos gerentes a um objetivo particular;
- b) a diferente noção de tempo e urgência entre as áreas;
- c) a orientação interpessoal, ou a forma como um gerente se relaciona com subordinados em cada área;
- d) e a diversidade na estrutura formal, diferentes áreas possuindo estruturas mais rígidas ou mais adaptáveis dentro da mesma organização.

A diferenciação é um conceito oposto e concorrente à integração. Integração define o nível de colaboração entre as áreas, a capacidade da estrutura gerencial de lidar com conflitos de interesse e focar os esforços da organização rumo a um objetivo comum (LAWRENCE; LORSCH, 1969).

## 2.5.2. Organização baseada em projetos

O PMI define um projeto como “um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo” (PMI, 2013).

Shenhar e Dvir (2010) fornecem características mais abrangentes de projeto:

“projetos envolvem uma iniciativa única, tal como lançamento de um novo produto, novas organizações ou novos empreendimentos, melhorias em produtos existentes, um investimento em infraestrutura, a fim de alcançar um objetivo. A organização deve reservar parte ou a totalidade de seus recursos ao projeto. Esta estrutura gerencial dentro da organização pode ser chamada de organização baseada em projetos”.

O PMI define uma organização baseada em projetos como:

“(…) várias formas organizacionais que criam sistemas temporários para executar seu trabalho. Organizações baseadas em projetos podem ser criadas por diferentes tipos de organizações. O uso de organizações baseadas em projetos deve diminuir a hierarquia e a burocracia dentro da organização visto que o sucesso do trabalho é medido pelo resultado final em vez de posição e políticas” (PMI, 2013).

A organização baseada em projetos representa um alto nível de integração na estrutura organizacional. Esta forma de se organizar favorece ao desenvolvimento de projetos altamente complexos, lida melhor com incertezas e necessidades da inovação, propriedades emergentes, responde melhor às mudanças constantes dos clientes e permite o aprendizado em tempo real (HOBDAI, 2000).

Organizações baseadas em projetos também conseguem lidar com as necessidades de diferenciação. A utilização deste tipo de estrutura organizacional permite mediar o conflito entre as pressões de integração e diferenciação (MELKONIAN; PICQ, 2011).



As fraquezas da organização baseadas em projetos estão exatamente onde as organizações mais hierarquizadas e rígidas são mais fortes: coordenação de recursos e capacitação entre projetos, execução de operações de rotina como produção e tarefas de engenharia, e no alcance de economias de escala e atendimento de mercados de massa (HOBDAÏ, 2000).

Apesar de um projeto se tratar de um esforço temporário para alcance de um objetivo (LUNDIN; SÖDERHOLM, 1995; SHENHAR; DVIR, 2010), o conhecimento adquirido em um projeto deve repercutir nos projetos futuros. Engwall (2003) propõe: “*the project needs to be conceptualized as a history-dependent and organizationally-embedded unity of analysis*” (pp. 790) (Traduzido: “o projeto precisa ser conceitualizado como uma unidade de análise dependente do histórico e incorporado na organização”).

Portanto uma organização baseada em projeto (PBO – *Project Based Organization*) não deve se limitar ao ciclo de vida tradicional, deve se estender às operações de forma a alimentar a base de conhecimento da organização Cicmil *et al.*, 2006). A extensão do projeto além do ciclo de vida tradicional se é necessária para a criação de capacitações de projeto na organização. Estas capacitações são formadas por processos de aprendizagem. Estes processos tornam duradouros os conhecimentos, tanto técnico como organizacional, adquiridos ao longo de diversos projetos (MELKONIAN; PICQ, 2011).

## 2.6. **Aprendizagem pelo uso**

Outro conceito aplicado neste trabalho é o de aprendizagem pelo uso. Esta aplicação se dá pela adoção do modelo da inovação *chain-linked* (ROSENBERG, 2006). A adoção de um modelo para o estudo da inovação visa facilitar o entendimento da forma como a inovação ocorre e dos fluxos de informação ao longo do processo.

Rosenberg (2006) aponta que o processo de inovação se dá por meio de inúmeros pequenos processos de aprendizado. Estes processos podem ser

estudados em dois extremos ao longo do processo de inovação. Na extremidade da pesquisa básica, temos o aprendizado das leis da natureza e aplicações úteis para esse conhecimento. Já na extremidade de desenvolvimento, a aprendizagem consiste na busca das características ótimas de um produto.

Rosenberg (2006) aponta também que novas correntes de estudo desse aprendizado se voltam ao conhecimento adquirido durante a produção de um bem, a aprendizagem na prática, que agrega conhecimento capaz de gerar melhoria no processo produtivo.

Em seu trabalho, Rosenberg (2006) apresenta um outro conceito de aprendizado que gera conhecimento relevante para os processos de inovação de uma organização, a aprendizagem pelo uso.

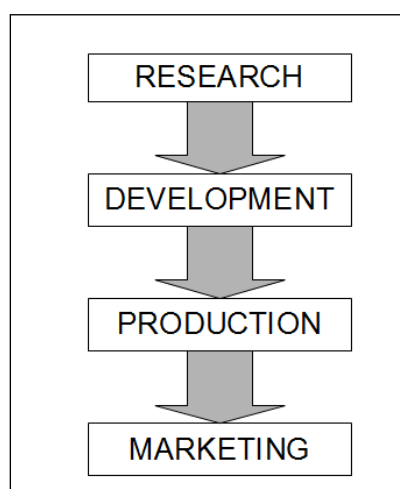
A aprendizagem pelo uso é o fluxo de informações do ambiente operacional do produto para a base de conhecimento da organização. Esse conhecimento não pode ser adquirido num processo tradicional de inovação, e somente estará disponível após uso extenso de um produto. Características como durabilidade, fadiga, conforto, exposição ao ambiente operacional real só serão reveladas durante o uso (ROSENBERG, 2006).

Além disso, Rosenberg (2006) destaca outra forma de aprendizado pelo uso, que são as adaptações do produto realizadas pelo próprio usuário.

A aprendizagem pelo uso é notável na indústria aeronáutica, na qual o conhecimento gerado ao longo da vida útil de um produto é extensivamente reportado, analisado e utilizado como guia para inovações futuras. Não somente nas características de desempenho do produto como na prospecção de novos mercados pelo registro das necessidades apontadas pelos clientes (ROSENBERG, 2006).

O conceito de aprendizagem pelo uso é nitidamente representado pelo modelo *chain-linked* desenvolvido por Kline (1985). Este modelo aprimora o tradicional modelo linear da inovação, no qual considera-se o processo de inovação uma sequência de eventos como representado pela Figura 2.6. No modelo linear não há retrocessos nem realimentação, o motor da inovação é a pesquisa científica.

Figura 2.6 – Modelo Linear da Inovação



Fonte: Kline e Rosenberg (1986).

O Modelo *chain-linked*, incorpora no estudo do processo de inovação, e por consequência na aprendizagem, o fato de que a inovação é complexa, incerta e desordenada, além de estar sujeita a alterações de diversos tipos de maneira imprevisível (KLINE; ROSENBERG, 1986).

No modelo *chain-linked* o motor da inovação são as pressões do mercado. A pesquisa deixa de fazer parte do caminho principal da inovação e passa a atuar como um recurso adotado quando o estoque de conhecimento existente não atender às necessidades do processo de inovação (KLINE; ROSENBERG, 1986).

No modelo *chain-linked*, mostrado na Figura 2.7, o processo de inovação é iniciado pela informação oriunda do mercado sobre necessidades e oportunidades detectadas no ambiente operacional (F). O caminho principal da

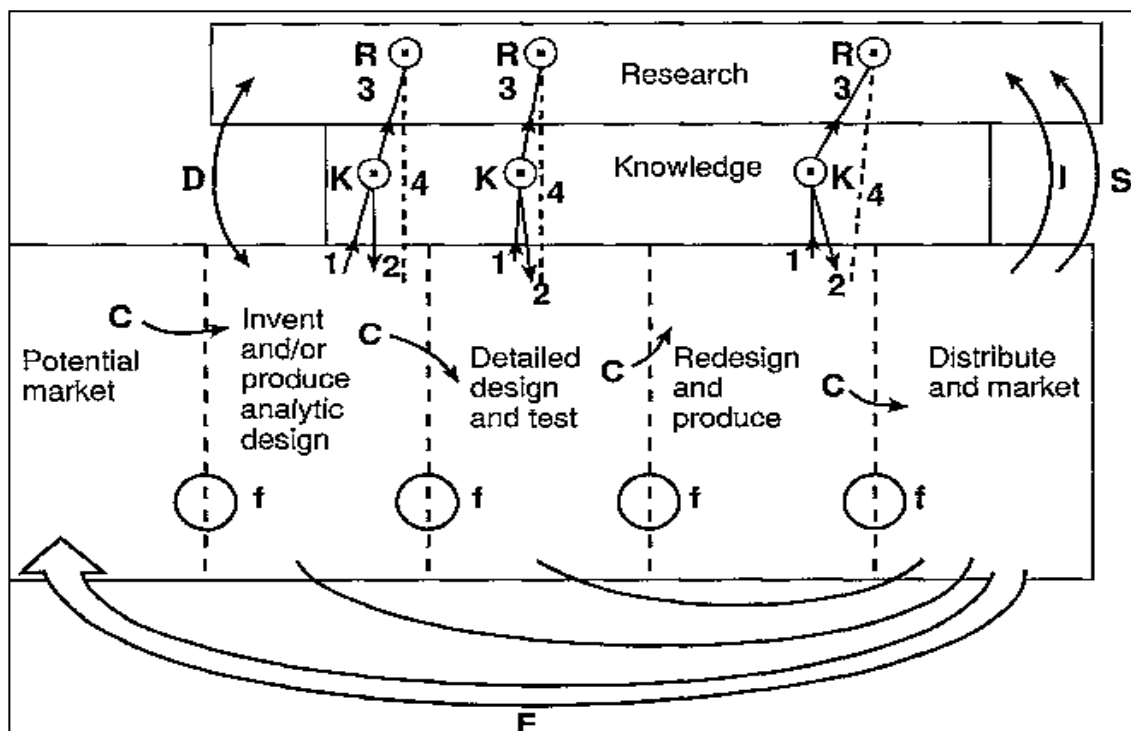
inovação (C) segue então pelos estágios de invenção; projeto detalhado; reprojeto e produção; e finalmente a distribuição.

No modelo *chain-linked*, realimentações e retrocessos entre as fases da inovação são consideradas, representados no modelo pelos fluxos (f).

A partir do estágio de invenção, caso sejam necessárias soluções tecnológicas, primeiro se busca no estoque de conhecimento disponível soluções prontas para problemas similares (K). Caso não existam soluções disponíveis, o processo de pesquisa acontece (R).

Além desses ciclos, a pesquisa possui uma ligação natural com a invenção representada pelo fluxo D, e um fluxo de realimentação do mercado, tanto em métodos e ferramentas (I) como nas características do produto em ambiente operacional (S).

Figura 2.7 – Modelo *chain-linked*.



Fonte: Kline e Rosenberg (1986)

### 3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresentará as limitações da aplicação do modelo NTCR em projetos aeroespaciais, a proposta deste trabalho para refinamento deste modelo e a metodologia utilizada neste trabalho.

#### 3.1. Limitações da dimensão complexidade do modelo NTCR

Como já foi visto na fundamentação teórica, a avaliação da dimensão complexidade do modelo original considera que um projeto de escopo limitado é mais simples, e um de escopo mais amplo é mais complexo.

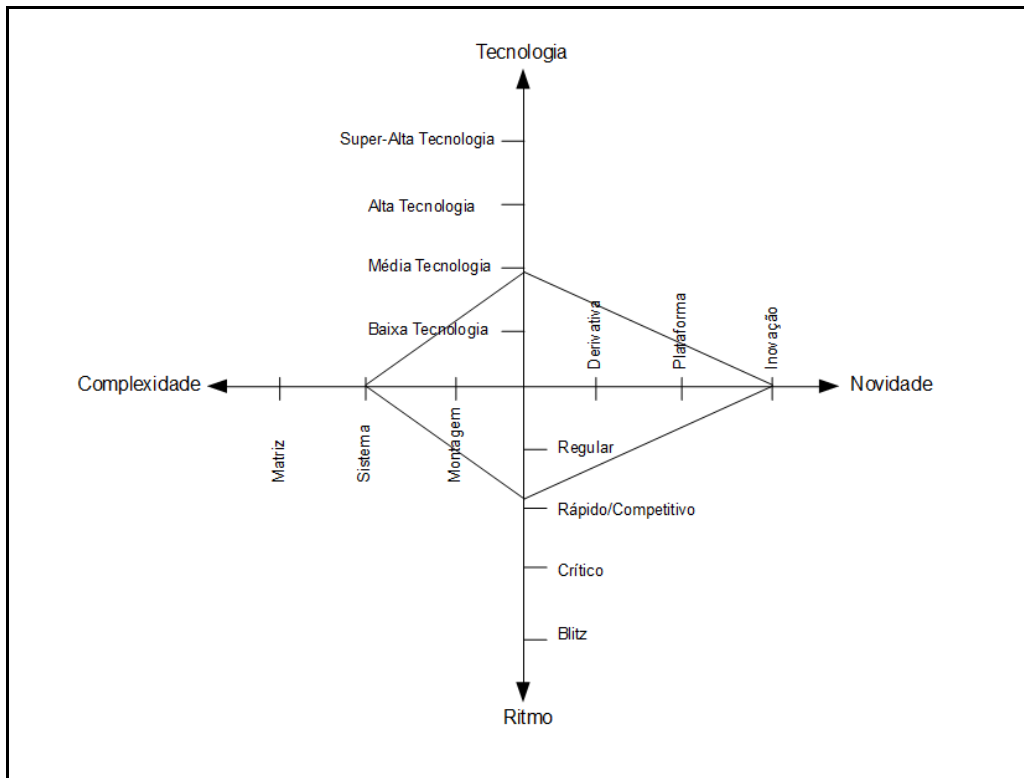
A escala da dimensão complexidade é baseada em níveis hierárquicos. Esta dimensão era denominada “escopo do sistema” em trabalhos anteriores (SHENHAR; DVIR, 1996; SHENHAR; WIDEMAN, 2002).

A limitação da dimensão complexidade para aplicação em projetos de desenvolvimento aeroespacial é que a maioria dos projetos realizados nesse ambiente é classificada como sistema.

Para demonstrar este fato, são apresentados a seguir estudos de caso realizados por Shenhar *et al.* (2005):

- Kepler – trata-se de um observatório espacial heliossíncrono (que possui um plano orbital fixo em relação ao Sol) com a missão de localizar exoplanetas (planetas que orbitam uma estrela que não seja o Sol) similares à Terra. Possui um telescópio e sensores ópticos extremamente sensíveis. O sistema completo pesa cerca de uma tonelada e é composto por subsistemas de alto desempenho integrados para uma missão inédita (NASA, 2013). A avaliação do modelo NTCR do projeto Kepler é apresentado na Figura 3.1;

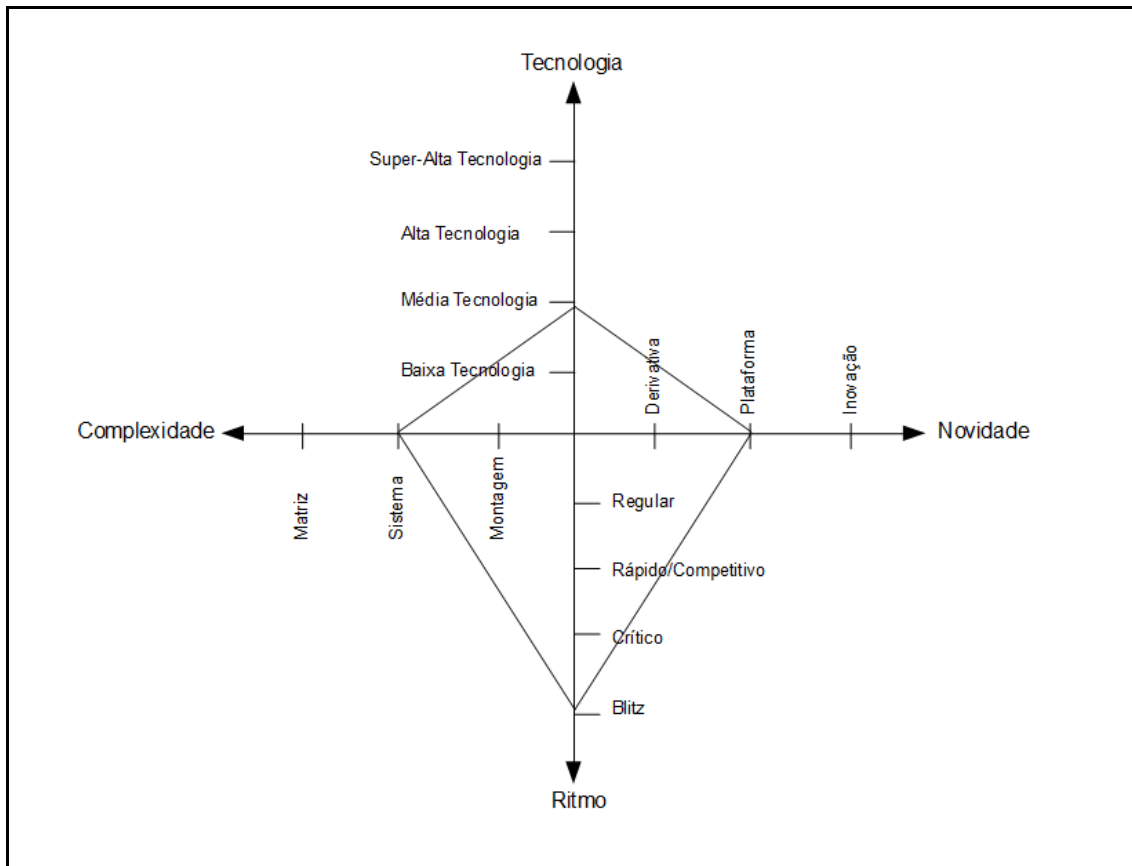
Figura 3.1 - Modelo NTCR do projeto Kepler.



Fonte: Shenhar *et al.* (2005) (adaptado)

- OBSS (*Orbiter Boom Sensor System* – Sistema de Sensores Orbital em Lança) – Este projeto se trata de um sistema de extensão do braço robótico do Ônibus Espacial *Discovery*. Essa extensão possui uma câmera acoplada em sua ponta para permitir aos astronautas a verificação da proteção da espaçonave (HEINEY, 2005). A avaliação do modelo NTCR do OBSS é apresentada na Figura 3.2;

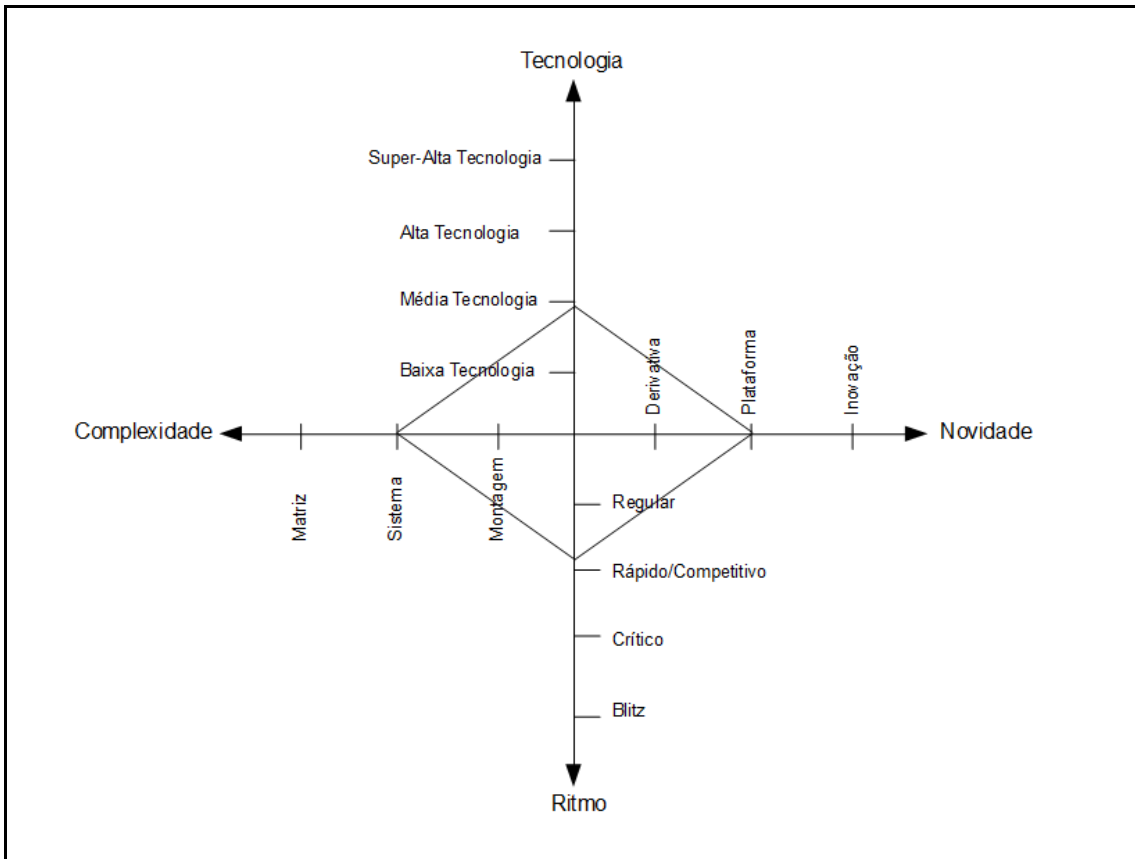
Figura 3.2 - Modelo NTCR do OBSS



Fonte: Shenhar *et al.* (2005)

- SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy* – Observatório Estratosférico para Astronomia Infravermelha) – Este é o projeto de um telescópio óptico com sensores de infravermelho embarcado em uma aeronave Boeing 747. Este projeto tem como requisito uma vida útil de 20 anos (NASA, 2010). A avaliação do modelo NTCR do projeto SOFIA é apresentado na Figura 3.3;

Figura 3.3 - Modelo NTCR do projeto SOFIA

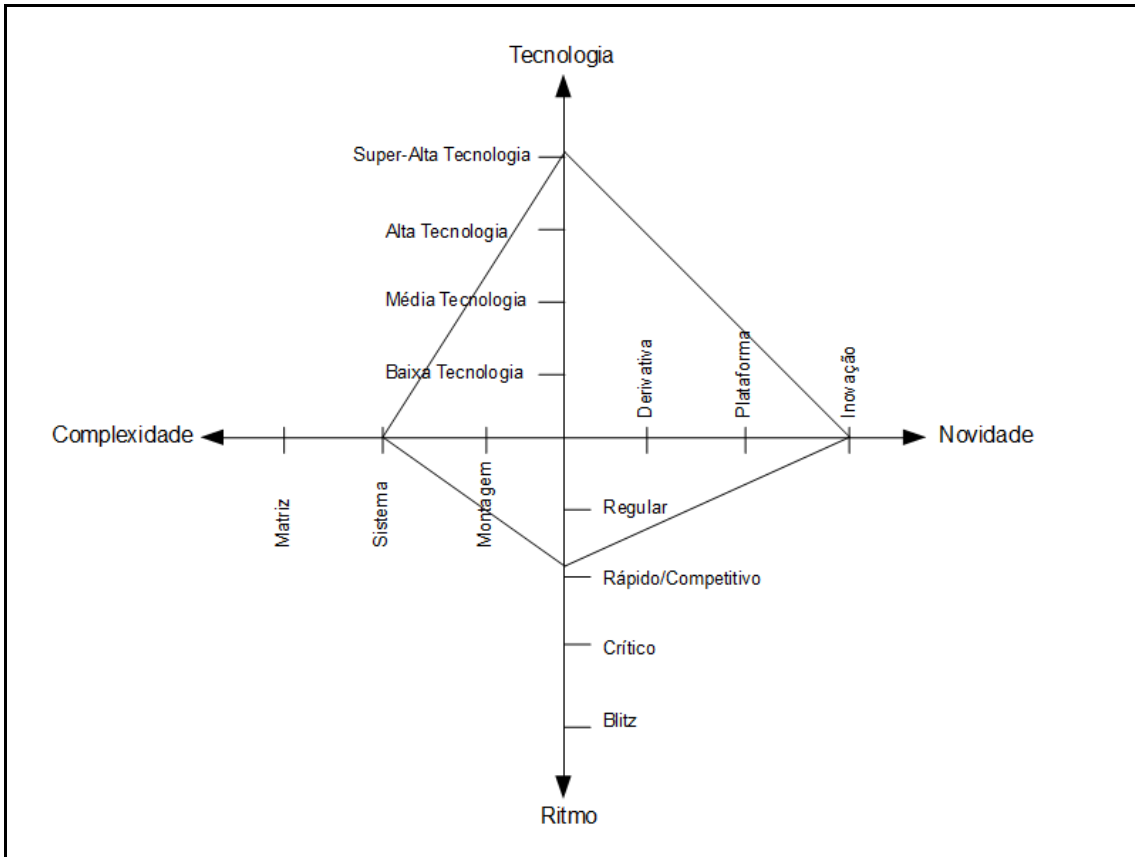


Fonte: Shenhar *et al.* (2005) (adaptado)

- ST-5 (*Space Technology 5 – Tecnologia Espacial 5*) – Este projeto é parte do programa *New Millenium* (Novo Milênio) da NASA, que visa desenvolver conceitos tecnológicos com missões de baixo custo. O ST-5 é uma constelação de 3 satélites projetados para estudar características da magnetosfera terrestre e validar tecnologias de microssatélites (NASA, 2006). A avaliação do modelo NTCR do projeto SOFIA é apresentado na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Modelo NTCR do projeto ST-5



Fonte: Shenhar *et al.* (2005) (adaptado)

Estes quatro sistemas atenderam seus requisitos e são considerados projetos de sucesso. Todos possuem graus de complexidade distintos e, portanto, diferentes níveis de incerteza.

Nestes estudos de caso, porém, todos os projetos avaliados foram classificados como “sistema”, e, portanto, considerados similarmente complexos (SHENHAR *et al.*, 2005).

Então a escala da dimensão “complexidade” não traz uma avaliação de risco relevante no contexto aeroespacial, onde a maioria dos projetos é classificada hierarquicamente como “sistema”.

### 3.2. Proposta

O modelo diamante é adaptativo e pode possuir outras dimensões relevantes para cada organização. É possível avaliar o nível de incertezas diversas como políticas, financeiras, geográficas, entre outras (SHENHAR; DVIR, 1996).

A proposta deste trabalho é modificar as escalas de classificação das dimensões “complexidade” e “tecnologia”. As novas escalas são baseadas em valores de IRL e TRL respectivamente.

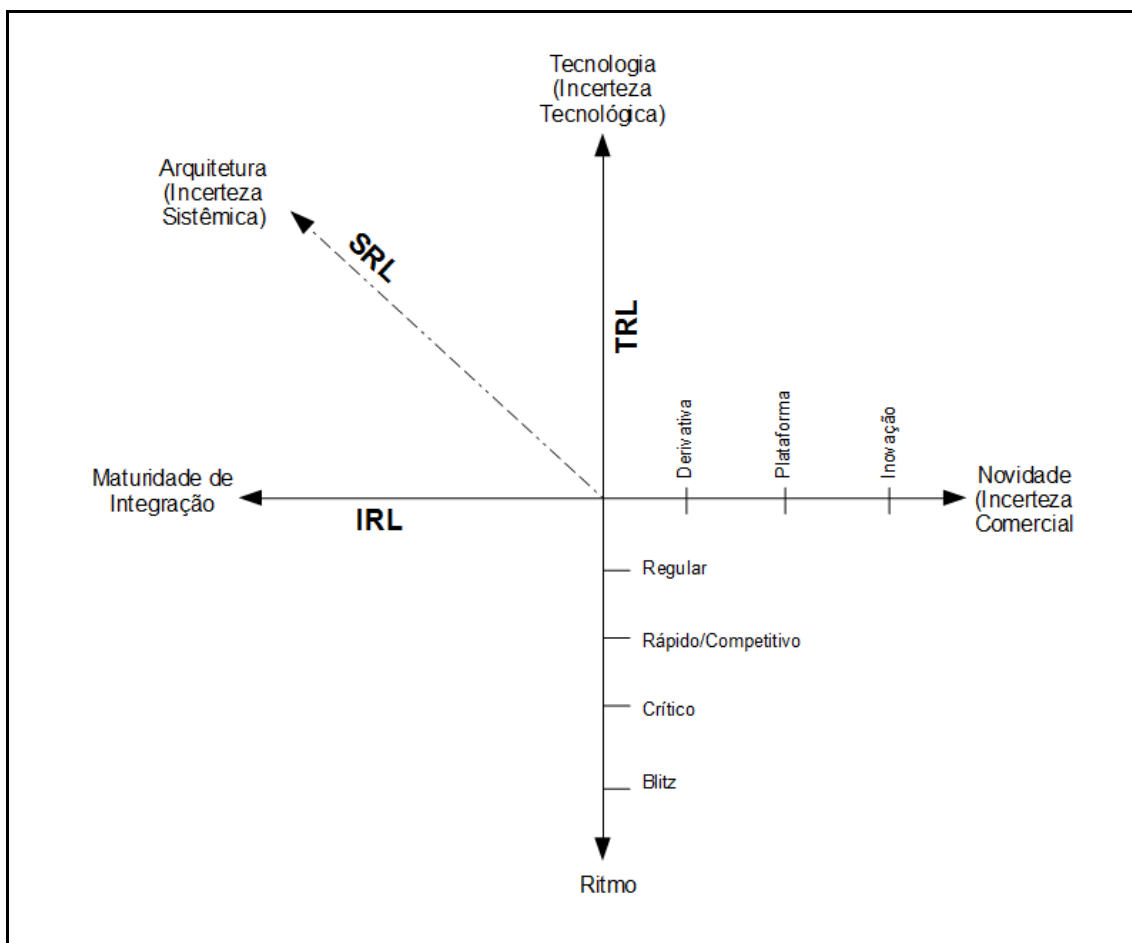
A modificação proposta gera ainda uma dimensão derivada, cuja escala é dada pelo valor de SRL. Esta dimensão foi denominada “arquitetura”, visto que ela representa o nível de incerteza proveniente da arquitetura do sistema.

Esta modificação pretende expor as incertezas geradas pelas propriedades emergentes. Estas incertezas são relevantes em projetos de inovação de sistemas complexos.

A aplicação do modelo demonstrará como a avaliação de maturidade e o modelo NTCR refinado utilizados ao longo de um projeto se coadunam com as premissas do modelo da inovação *chain-linked*.

A representação gráfica do modelo NTCR refinado é apresentada na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Modelo NTCR refinado



Fonte: Produção do autor

Este refinamento fará com que o modelo passe a avaliar o risco de projetos aeroespaciais de forma específica. A alta complexidade dos sistemas aeroespaciais é originada principalmente pelo grande número de tecnologias e da alta interdependência entre elas. A avaliação de IRL concentra-se exatamente na avaliação destas variáveis.

### 3.3. Metodologia

Esta pesquisa demonstrou como a avaliação do nível de maturidade do sistema (SRL) capta a incerteza sistêmica e é definida a partir do produto do IRL pelo TRL.

Os estudos de caso desta pesquisa consistiram na avaliação da maturidade sistêmica dos projetos utilizando o método SRL. Para isso foram avaliadas as tecnologias individualmente com a metodologia TRL. Em seguida as inter-relações entre os pares tecnológicos foram avaliadas pela metodologia IRL. Os valores atribuídos foram utilizados para o cálculo da maturidade sistêmica total conforme as Equações 2.1; 2.2; 2.3 e 2.4.

Foi realizado um estudo de caso sobre o satélite CBERS-2B, desenvolvido pelo INPE. O CBERS-2B é um satélite de sensoriamento remoto, capaz de fornecer imagens terrestre em alta resolução. Este estudo de caso teve como objetivo demonstrar a utilização das escalas de complexidade, tecnologia e arquitetura no início de um projeto derivado de uma arquitetura bem-sucedida.

Foi realizado um estudo de caso sobre o foguete VSB-30 que é um projeto bem-sucedido desenvolvido pelo IAE. Este foguete realiza missões científicas em microgravidade. Este estudo de caso teve como objetivo demonstrar como as escalas de complexidade, tecnologia e arquitetura são capazes de revelar oportunidades de melhorias em produtos já estabelecidos e explicitar o aprendizado pelo uso rompendo a barreira temporal da organização baseada em projetos.

A avaliação de maturidade utilizando as metodologias TRL/IRL/SRL necessita de um esforço conjunto entre as áreas envolvidas no desenvolvimento do projeto. É necessária uma série de reuniões e o levantamento de extensa documentação comprobatória para os níveis de maturidade.

Para fins acadêmicos, as avaliações de maturidade apresentadas neste trabalho foram realizadas de maneira simplificada. Foram realizadas reuniões com profissionais experientes que participaram intensamente do desenvolvimento, integração e missões de lançamento dos sistemas completos. Essas reuniões tiveram como objetivo apresentar aos participantes as metodologias de avaliação de maturidade e o objetivo da pesquisa. Os participantes foram questionados quanto à estrutura do sistema em questão, as

variações presentes nos sistemas e problemas encontrados nas fases de desenvolvimento e integração. Foi também solicitada aos participantes documentação ou indicação de bibliografia pertinente para comprovação dos níveis alcançados.

A classificação dos níveis de maturidade tecnológica e de integração levou em consideração as informações coletadas nas reuniões, os dados de relatórios internos fornecidos pelos participantes, e as informações contidas na bibliografia disponível.

Esta metodologia foi elaborada a partir dos conceitos de estudo de caso apresentados por Yin (2015).



#### **4 ESTUDO DE CASO: PROJETO CBERS 2B**

O programa de satélites de sensoriamento remoto CBERS é um programa de cooperação entre os governos do Brasil e da China. Ambos os governos tinham como diretriz incentivar o desenvolvimento tecnológico no setor espacial para fortalecimento da indústria (INPE, 2015).

A assinatura do acordo em 6 de julho de 1988 buscava contornar dificuldades impostas pelos países desenvolvidos na transferência tecnológica (INPE, 2015).

O acordo original previa o desenvolvimento, construção e lançamento de dois satélites: CBERS 1 e 2.

O CBERS 1 foi lançado com sucesso em 14/10/1999 (INPE, 2011a) e operou até agosto de 2003. Seu sucessor, o CBERS 2, foi lançado em 21 de outubro de 2003 (INPE, 2011b) e operou até 15 de janeiro de 2009 (INPE, 2009b; Câmara, 2010; INPE, 2014).

Em novembro de 2002, os dois países assinaram um acordo para continuação do programa, com a contratação do desenvolvimento de dois novos satélites, o CBERS 3 e 4 (INPE, 2015).

Tendo em vista o prazo necessário para o desenvolvimento dessa nova geração de satélites, ocorreria a interrupção do serviço de imageamento devido ao final da vida útil do CBERS 2. Foi então assinado um acordo complementar em 2004 para o lançamento do satélite CBERS-2B (EPIPHANIO, 2011).

Em 2004, data de assinatura do acordo complementar, o CBERS 1 já havia completado sua missão superando sua vida útil projetada de dois anos (INPE, 2009), demonstrando que sua arquitetura havia alcançado o mais alto nível de maturidade. O CBERS-2, que por sua vez é tecnicamente idêntico ao CBERS-1 (INPE, 2011), já se encontrava em plena operação reforçando esta avaliação.

O projeto do CBERS-2B era capaz de atender os prazos pois utilizava de diversos componentes sobressalentes do CBERS-2 (INPE, 2007).

Este estudo de caso visa demonstrar como a avaliação de maturidade aplicada no início de um projeto capta a incerteza derivada da complexidade, e pode auxiliar decisões gerenciais.

#### **4.1. Identificação da Arquitetura do CBERS-2B**

A arquitetura do CBERS-2B se baseia nos dois satélites anteriores, porém a câmera IRMSS (*Infrared Multispectral Scanner – Sensor Multiespectral Infravermelho*) foi substituída pela câmera imageadora de alta resolução pancromática (HRC – *High Resolution Camera*) (INPE, 2007).

A alteração da câmera determinou a necessidade de adaptações na operação do satélite em relação ao CBERS-2 (EIPHANIO, 2009). Também foi substituído o gravador de dados analógico por um sistema de gravação de dados digitais (INPE, 2007).

A arquitetura do CBERS-2B foi identificada por meio de consulta à relatórios internos do INPE (2007). Os elementos tecnológicos identificados para aplicação do modelo são os seguintes:

- a) AOCS – *Attitude and Orbit Control System* (Sistema de controle de Atitude e Órbita);
- b) Câmera CCD (*Charged Coupled Device – Dispositivo de Carga Acoplada*);
- c) Câmera Pancromática HRC (*High Resolution Camera – Camera de Alta Resolução*);
- d) Câmera WFI (*Wide Field Imager – Imageador de Amplo Campo*);



- e) CCD DT (*CCD Data Transmitter* – Transmissor de Dados da Câmera CCD);
- f) Controle Térmico;
- g) DCS (*Data Collecting Subsystem* – Subsistema de Coleta de Dados);
- h) DDR (*Digital Data Recorder*- Gravador de Dados Digitais);
- i) Estrutura;
- j) HRC DT (*High Resolution Camera Data Trasmmitter* – Transmissor de Dados da Câmera de Alta Resolução);
- k) Potência;
- l) SEM (*Space Environment Monitor* – Monitor do Ambiente Espacial);
- m) Supervisão *On Board* (OBDH – *On Board Data Handling*)
- n) Telecomunicações de serviço.

#### **4.2. Critérios de Avaliação de TRL e Resultados**

A avaliação de TRL dos subsistemas foi baseada nas descrições dos níveis apresentados na Tabela 2.1. Esta avaliação leva em conta a situação do satélite CBERS-2B em 2004, data da assinatura do acordo complementar.

Na avaliação de TRL do CBERS-2B, parte dos subsistemas sofreram alterações mínimas em relação ao CBERS-1 e 2, sem novas tecnologias a serem maturadas. Estes subsistemas não necessitaram de novos testes ou comprovações além dos testes de aceitação usuais (INPE, 2007). Sendo assim já estavam comprovados em missão, ou seja, TRL 9.

O AOCS por sua vez, recebeu novas funções para atender os requisitos de precisão de apontamento da Câmera HRC. Esta nova versão do AOCS não

precisou de novos testes em ambiente relevante. No entanto o desempenho em ambiente operacional ainda não havia sido demonstrado, sequer com protótipos. Isto indica que o seu TRL era 6.

O subsistema de telecomunicações de serviço foi atualizado com a inclusão da funcionalidade de GPS (*Global Positioning System*), e atualização da interface da câmera WFI. Então, da mesma forma que o AOCS, este subsistema carecia de demonstração em ambiente operacional, ou seja, TRL 6

Houve mudanças no subsistema de processamento de dados embarcado (OBDH), sendo que alguns componentes foram substituídos e o software foi atualizado para atender a nova configuração (INPE, 2007). Alguns destes componentes substituídos ainda careciam de resultados de testes em ambiente relevante, o que representa um TRL 4.

Os itens novos da arquitetura do CBERS-2B também precisaram ser validados em ambiente relevante: Câmera HRC; HRC DT e DDR. Então estes componentes possuíam TRL 4.

Estes resultados estão dispostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de TRL para os subsistemas do projeto CBERS-2B.

<b>Subsistema</b>	<b>TRL</b>
AOCS	6
Câmara CCD	9
Câmara HRC	4
Câmara WFI	9
CCD DT	9
Controle Térmico	9
DCS	9
DDR	4
Estrutura	9
HRC DT	4
Potência	9
SEM	9
Supervisão <i>On Board</i>	4
Telecomunicações de serviço	6

Fonte: Produção do autor.

#### 4.3. Critérios de Avaliação de IRL e Resultados

A avaliação de IRL do CBERS-2B foi baseada na descrição dos níveis apresentada na Tabela 2.2. Esta avaliação leva em conta a situação do satélite CBERS-2B em 2004, data da assinatura do acordo complementar.

A interface entre os subsistemas que já estavam presentes na arquitetura do CBERS-1 e 2 não sofreram modificações em suas tecnologias de integração.

Não foram necessárias comprovações adicionais do desempenho desses pares tecnológico (INPE, 2007). Estas interfaces já estavam comprovadas em missões, inclusive em uma missão completa (CBERS-1), portanto são avaliadas como IRL 9.

A interface entre os componentes novos (Câmera HRC; HRC DT e DDR) e o restante da arquitetura precisou passar pelo processo de maturação, e a avaliação dos níveis encontrados é descrita nas seções a seguir.

Os resultados desta avaliação são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de IRL para o CBERS-2B.

	<b>AOCS</b>	<b>Câmera CCD</b>	<b>Câmera HRC</b>	<b>Câmera WFI</b>	<b>CCD DT</b>	<b>Controle Térmico</b>	<b>DCS</b>	<b>DDR</b>	<b>Estrutura</b>	<b>HRC DT</b>	<b>Potência</b>	<b>SEM</b>	<b>Supervisão On Board</b>	<b>Telecomunicações de serviço</b>
<b>AOCS</b>	9	9	3	9	9	9	9	6	9	6	9	9	9	9
<b>Câmera CCD</b>	9	9	4	9	9	9	9	4	9	6	9	9	9	9
<b>Câmera HRC</b>	3	4	9	4	4	6	4	4	6	4	6	4	6	4
<b>Câmera WFI</b>	9	9	4	9	9	9	9	4	9	6	9	9	9	9
<b>CCD DT</b>	9	9	4	9	9	9	9	4	9	6	9	9	9	9
<b>Controle Térmico</b>	9	9	6	9	9	9	9	6	9	6	9	9	9	9
<b>DCS</b>	9	9	4	9	9	9	9	4	9	9	9	9	9	9
<b>DDR</b>	6	4	4	4	4	6	4	9	6	4	6	4	4	4
<b>Estrutura</b>	9	9	6	9	9	9	9	6	9	6	9	9	9	9
<b>HRC DT</b>	6	6	4	6	6	6	9	4	6	9	6	9	6	6
<b>Potência</b>	9	9	6	9	9	9	9	6	9	6	9	9	9	9
<b>SEM</b>	9	9	4	9	9	9	9	4	9	9	9	9	9	9
<b>Supervisão on board</b>	9	9	6	9	9	9	9	4	9	6	9	9	9	9
<b>Telecomunicações de serviço</b>	9	9	4	9	9	9	9	4	9	6	9	9	9	9

Fonte: Produção do autor.

#### **4.3.1. Avaliação de IRL da Câmera HRC**

No par tecnológico AOCS – Câmera HRC, o conceito e as características dessa integração eram conhecidos, alcançando IRL 3. Este par tecnológico era inédito nesta arquitetura e seu acoplamento é fundamental para a missão. Os requisitos de apontamento da câmera dependiam da precisão do novo sistema AOCS. Este par tecnológico precisava ainda de garantia da qualidade da integração para alcançar o IRL 4.

Os seguintes pares tecnológicos da câmera HRC atingiram IRL 4: Câmera CCD; Câmera WFI; CCD-DT; DCS; DDR; HRC-DT; SEM e Telecomunicações de serviço. Já era possível garantir qualidade da integração entre a câmera HRC e estas tecnologias, no entanto ainda era necessário testar a capacidade destes pares de controlar a integração, inclusive suas interferências e requisitos conflitantes para alcançar o IRL 5. Testes foram realizados posteriormente a esta avaliação com esta finalidade, como testes de balanço térmico e de interferência eletromagnética (INPE, 2007).

Os seguintes pares tecnológicos da câmera HRC atingiram IRL 6: Controle térmico; Estrutura; Potência e OBDH. Nestes pares os requisitos técnicos já eram conhecidos e as tecnologias eram interoperáveis. No entanto careciam de validação para comprovar o atendimento dos requisitos da missão para alcançar o IRL 7. A documentação posterior a esta avaliação relatou que testes do sistema completo foram realizados com essa finalidade (INPE, 2007).

#### **4.3.2. Avaliação de IRL do HRC-DT**

O par tecnológico HRC-DT – Camera HRC está descrito na seção anterior.

O par tecnológico HRC-DT – DDR foi avaliado como IRL 4 pois a linguagem de comunicação entre estas tecnologias era um requisito conhecido, e era possível garantir a qualidade da integração. Porém ainda foi necessário comprovar que as tecnologias podiam controlar a troca de dados e suas

interferências para atender os requisitos da missão e alcançar o IRL 5 (INPE, 2007).

Todos os demais pares tecnológicos foram avaliados como IRL 6. Nestes pares os requisitos técnicos já eram conhecidos e as tecnologias eram interoperáveis, no entanto careciam de validação para comprovar o atendimento dos requisitos da missão e alcançar o IRL 7. A documentação posterior a esta avaliação relatou que testes do sistema completo foram realizados com esta finalidade (INPE, 2007).

#### **4.3.3. Avaliação de IRL do DDR**

Os pares tecnológicos DDR – Câmera HRC e DDR – HRC-DT são descritos nas seções anteriores.

Os seguintes pares tecnológicos do DDR atingiram IRL 4: Câmera CCD; Câmera WFI; CCD-DT; DCS; SEM; OBDH e Telecomunicações de serviço. Já era possível garantir qualidade da integração entre o DDR e estas tecnologias, no entanto ainda era necessário testar a capacidade destes pares de controlar a integração, inclusive suas interferências e requisitos conflitantes para alcançar o IRL 5. Testes foram realizados posteriormente a esta avaliação com esta finalidade, como testes de balanço térmico e de interferência eletromagnética (INPE, 2007).

Os seguintes pares tecnológicos do DDR atingiram IRL 6: AOCS; Controle térmico; Estrutura e Potência. Nestes pares os requisitos técnicos já eram conhecidos e as tecnologias eram interoperáveis, no entanto careciam de validação para comprovar o atendimento dos requisitos da missão e atingir o IRL 7. A documentação posterior a esta avaliação relatou que testes do sistema completo foram realizados com essa finalidade (INPE, 2007).

#### 4.4. Cálculo da maturidade sistêmica total

Utilizando a Equação 2.3, foi obtido o vetor com os valores de SRL de cada subsistema apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores de SRL para o projeto CBERS-2B.

<b>Subsistema</b>	<b>SRL</b>
AOCS	0,751
Câmera CCD	0,748
Câmera HRS	0,420
Câmera WFI	0,748
CCD DT	0,748
Controle Térmico	0,762
DCS	0,758
DDR	0,429
Estrutura	0,762
HRC DT	0,573
Potência	0,762
SEM	0,758
Supervisão <i>On Board</i>	0,755
Telecomunicação de Serviço	0,748

Fonte: Produção do autor.

Utilizando a Equação 2.4 foi possível calcular o valor de maturidade total da arquitetura do sistema, e o resultado foi de SRL total igual a 0,69 .

Para fins de comparação, foi efetuada a avaliação de TRL/IRL/SRL para o CBERS-2 levando-se em conta sua situação na mesma época da avaliação do CBERS-2B. A semelhança com o CBERS-1 faz com que seus índices se apresentem no nível máximo de maturidade, com um SRL total igual a 1, pois em 2004 esta arquitetura já estava comprovada em uma missão completa, pequenos ajustes de configuração foram efetuados na maioria dos subsistemas, porém, não houveram alterações de tecnologias utilizadas ou de integração entre os pares de subsistemas não havendo assim motivos para reduzir o nível máximo de maturidade alcançado pela arquitetura.



## **5 ESTUDO DE CASO: PROJETO VSB-30**

O foguete de sondagem VSB-30 foi desenvolvido pelo IAE em conjunto com o Centro Aeroespacial Alemão (DLR – *Deutsch Zentrum für Luft und Raumfahrt*) como substituto para o foguete Skylark 7 (PALMÉRIO *et al.*, 2005).

O VSB-30 é um foguete de propulsão sólida de dois estágios, estabilizado por giro sem controle ativo. Ele é capaz de realizar experimentos em ambientes de microgravidade (PALMÉRIO *et al.*, 2003).

O VSB-30 foi desenvolvido baseado no foguete anterior, Veículo de Sondagem VS-30 que consistia do primeiro estágio do bem sucedido foguete modelo SONDA III, que era capaz de enviar pequenas cargas ao ambiente de microgravidade (PALMÉRIO *et al.*, 2003).

Este estudo de caso visa demonstrar como a aplicação da avaliação de maturidade em um produto bem-sucedido pode ser utilizada como uma ferramenta para identificar oportunidades de melhoria.

### **5.1. Identificação da arquitetura do foguete VSB-30**

O foguete VSB-30 é constituído de um motor modelo S30 que foi utilizado anteriormente tanto pelo VS-30 quanto pelo SONDA III; por um motor modelo S31 que é uma versão encurtada do S30 carregado com um propelente de queima rápida; um conjunto de empenas para estabilizar o voo; um Sistema de Indução de Rolamento (SIR) que é acionado após a decolagem; e um sequenciador de eventos (PALMÉRIO *et al.*, 2003).

### **5.2. Critérios de Avaliação de TRL e Resultados**

A avaliação de TRL dos subsistemas do foguete VSB-30 foi baseada nas descrições dos níveis apresentados na Tabela 2.1. Esta avaliação leva em conta a situação atual de maturidade dos componentes.

O foguete VSB-30 já completou quinze missões bem sucedidas (IAE, 2015). Os componentes da arquitetura funcionam individualmente conforme os requisitos. De fato, aplicando a metodologia TRL nos subsistemas, todos os subsistemas alcançam o nível máximo de maturidade conforme apresentado na Tabela 5.1, a avaliação dos subsistema é detalhado a seguir.

Tabela 5.1 – Níveis de maturidade tecnológica dos subsistemas do foguete VSB-30.

<b>Subsistema</b>	<b>TRL</b>
Motor S30	9
Motor S31	9
SIR	9
Empenas	9
Sequenciador	9

Fonte: produção do autor.

É importante notar que o motor S30 já havia sido utilizado extensivamente pelos foguetes VS-30 e SONDA III, alcançando TRL 9.

O motor S31 é uma versão encurtada do S30 com características diferentes do propelente para uma queima rápida e, portanto, um impulso maior. O motor S31 passou pelo processo de desenvolvimento e todos os testes de solo e comprovações necessárias e, finalmente, pela aprovação em missões reais, portanto possui TRL 9.

O SIR já se encontrava em desenvolvimento para utilização em outro projeto, necessitando ainda de testes em voo no início do projeto, e o subsistema cumpriu sua função no VSB-30 conforme esperado sendo assim qualificado em voo e comprovado TRL 9.

Da mesma forma as empenas e o sequenciador de evento foram desenvolvidos e comprovados em missão, ambos também atingem TRL 9.

### 5.3. Critérios de Avaliação de IRL e Resultados

A avaliação de IRL do foguete VSB-30 foi baseada na descrição dos níveis apresentada na Tabela 2.2. Esta avaliação leva em conta a situação atual do foguete.

Aplicando o método proposto por Sauser para avaliação do IRL, o sistema demonstra um nível elevado de maturidade de integração, no entanto para alcançar o nível máximo na métrica IRL é necessária uma elevada compreensão das inter-relações entre os componentes e as propriedades que emergem dessas relações. É notável que o motor S31, o SIR e as empenas formam um grupo de elementos que possuem somente interações mecânicas com o motor principal. O sequenciador de eventos é responsável pela ignição do motor principal S30 e não tem interação funcional direta com o motor S31, as empenas ou o SIR.

A escala IRL vai além da operação em missão bem sucedida, é necessário que a organização tenha conhecimento profundo de taxas de falhas, relação entre custo operacional e benefício ao cliente, e outros conhecimentos originados do ambiente operacional após um grande número de missões.

Os resultados obtidos revelam a necessidade de continuar estudando o comportamento do sistema no ambiente operacional, aumentando assim a maturidade da arquitetura do sistema.

Esta necessidade emerge de dados obtidos no ambiente operacional que demonstram que a dispersão do ponto de impacto da carga útil, que, apesar de atender os requisitos iniciais, poderia ser melhorada permitindo uma operação mais segura, menor área de isolamento, e recuperação mais fácil da carga útil (GARCIA *et al.*, 2011).

A dispersão do ponto de impacto é relevante na operação na base de lançamento de Esrange na Suécia, onde o impacto da carga útil acontece em Terra e uma grande área de dispersão representa riscos de acidentes.

No Centro de Lançamento de Alcântara, no Brasil, o impacto ocorre em alto mar. Uma grande área de dispersão significa um elevado esforço de isolamento marítimo e uma missão de recuperação com maior grau de dificuldade, sendo possível que a carga útil seja perdida.

Os valores obtidos de IRL para o foguete VSB-30 são apresentados na Tabela 5.2. Os pares tecnológicos que afetam a trajetória, e por consequência a dispersão do ponto de impacto, foram reduzidos para IRL 8. O nível 8 indica que as integrações entre estes pares já foram qualificadas em missão. Os pares tecnológicos cuja integração não afeta a trajetória foram mantidos em IRL 9, ou seja, a integração entre eles é comprovada e atende plenamente os requisitos da missão, além de ser profundamente compreendida pela organização.

Tabela 5.2 – Valores de IRL para o foguete VSB-30.

	<b>Motor S30</b>	<b>Motor S31</b>	<b>SIR</b>	<b>Empenas</b>	<b>Sequenciador</b>
<b>Motor S30</b>	9	8	8	8	8
<b>Motor S31</b>	8	9	8	9	9
<b>SIR</b>	8	8	9	8	9
<b>Empenas</b>	8	9	8	9	9
<b>Sequenciador</b>	8	9	9	9	9

Fonte: produção do autor.

#### 5.4. Cálculo da maturidade sistêmica total

Aplicando a Equação 2.3 são obtidos os valores de SRL, apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores de IRL para o foguete VSB-30.

<b>Subsistema</b>	<b>SRL</b>
<b>Motor S30</b>	0,900
<b>Motor S31</b>	0,950
<b>SIR</b>	0,925
<b>Empenas</b>	0,950
<b>Sequenciador</b>	0,975

Fonte: Produção do autor.

O SRL total é calculado utilizando a Equação 2.4. O valor encontrado é de 0,94. Este valor revela que o sistema como um todo é altamente maduro, no entanto ainda existem oportunidades para uma melhor compreensão sobre o funcionamento do sistema e a influência de seus componentes na trajetória do foguete e portanto na dispersão do ponto de impacto.

Essa informação que surge do ambiente operacional, representa o fluxo “f” na Figura 2.7, onde o dado operacional impulsiona melhorias no projeto em si, e também representa o fluxo “F” onde estes dados alimentam a base de conhecimento e a capacitação da organização para desenvolvimentos futuros para atender à necessidade e eficiência operacional.



## 6 DISCUSSÃO

Baseado na pesquisa bibliográfica, e nos estudos de caso realizados, é possível perceber que a dimensão de complexidade do modelo diamante tradicional não capta as incertezas de um projeto aeroespacial.

A hierarquia sistêmica é apenas um dos possíveis indicadores relacionados à complexidade, sendo que este não é o indicador mais relevante no contexto aeroespacial.

Um nanossatélite bastante simples, um grande satélite de telecomunicações ou até mesmo uma nave tripulada seriam avaliados como pertencendo ao nível “sistema”. Porém, é evidente que o nível de complexidade é diverso nestes exemplos.

É possível numerar uma série de indicadores como submedidas da complexidade como, por exemplo, o número de componentes de um sistema; grau de customização; variedade de habilidades necessárias; etc. (HOBDA, 1998).

Um dos fenômenos mais relevantes da complexidade no estudo de sistemas complexos é a emergência complexa. Emergência complexa é o surgimento de propriedades emergentes imprevisíveis, e muitas vezes indesejadas, que ocorrem em um sistema complexo integrado (BAR-YAM, 2003; CHAGAS JÚNIOR; CAMPANÁRIO, 2014). A hierarquia sugerida por Shenhar e Dvir (2010) falha em captar esse aspecto importante de um sistema complexo.

A complexidade emergente de um sistema representa, de certa forma, a impossibilidade de prever *ex-ante* o comportamento do sistema em seu ambiente operacional (tanto seu funcionamento interno quanto a interação com os elementos do ambiente operacional). Então, é possível afirmar que a complexidade de um sistema está relacionada com o nível de maturidade de

integração de seus componentes e, portanto, da maturidade da arquitetura do sistema (SAUSER *et al.*, 2008).

Sistemas cujas tecnologias de integração da arquitetura são altamente conhecidas são também muito previsíveis. Então estes sistemas apresentam baixa incerteza sistêmica, uma vez que as relações de causa e efeito já foram mapeadas.

De maneira oposta, é difícil prever o comportamento de um sistema cujas características são pouco conhecidas, e portanto pouco controláveis. Este tipo de sistema é altamente incerto do ponto de vista sistêmico, pois suas relações de causa e efeito não são claras, este sistema está sujeito a ambiguidade causal (CHAGAS JÚNIOR; CAMPANÁRIO, 2014).

Comparando os projetos do CBERS-1; 2; 2b e 3 e o foguete VSB-30, todos estariam classificados no segundo nível da escala de complexidade do modelo NTCR original, o nível “Sistema”, porém há diferenças evidentes de complexidade entre eles e conseqüentemente de risco.

O projeto do CBERS-1 e 2 foi um desenvolvimento de um novo produto de dimensões inéditas para o INPE. Diversas tecnologias importantes foram desenvolvidas durante este projeto. Capacitações necessitavam ser aprimoradas ou até mesmo adquiridas em integração e testes para atender a grandeza do projeto.

Comparativamente o CBERS-2B tinha grande parte de sua arquitetura conhecida e, portanto, suas propriedades emergentes eram previsíveis. Grande parte da capacitação necessária já havia sido desenvolvida pelo instituto tanto em infraestrutura como em recursos humanos.

O CBERS-3 por sua vez encontra novamente um nível elevado de complexidade em vários aspectos. A arquitetura foi totalmente atualizada.



Muitas tecnologias novas foram desenvolvidas. As capacitações foram ampliadas devido ao aumento das dimensões e dos requisitos do projeto.

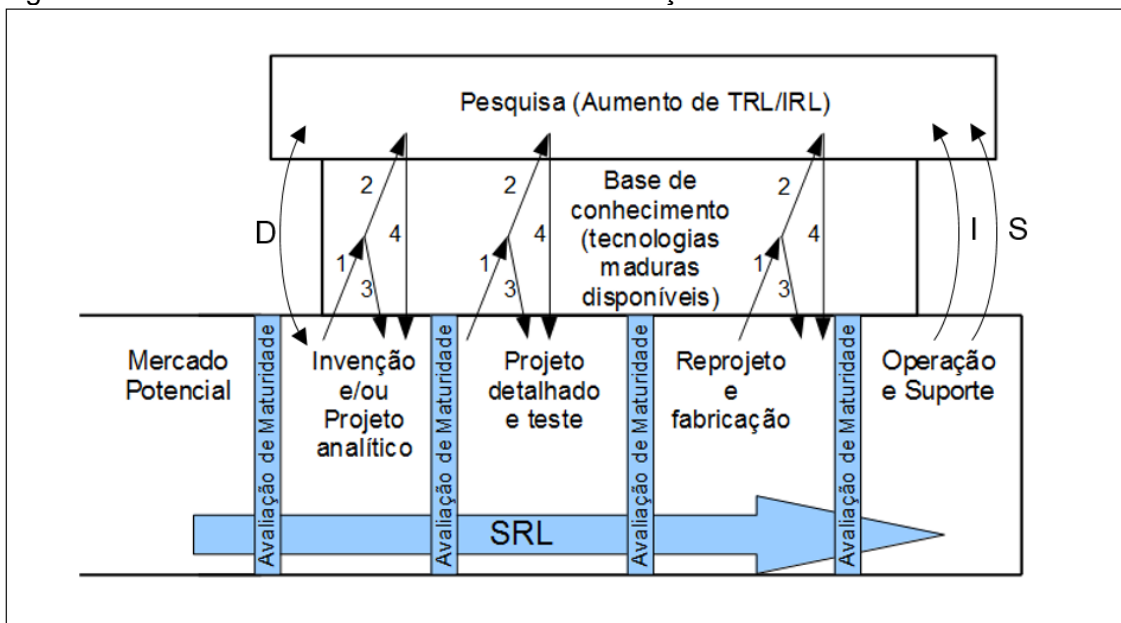
O VSB-30 apresenta uma arquitetura muito madura, que é capaz de atender às especificações das missões e sujeito a pequenas mudanças, pois sua arquitetura já é certificada.

Assim, é possível perceber que a metodologia TRL/IRL/SRL capta nuances da complexidade, na forma como a complexidade é proposta por Hobday (1998) e Simon (1996). Estas nuances não são captadas pela dimensão “complexidade” original do modelo NTCR, aspectos estes muito relevantes no gerenciamento de risco.

Outro ponto positivo é que a avaliação de maturidade capta a evolução do risco em qualquer fase do ciclo de vida do projeto. Na escala original do modelo NTCR, um projeto jamais teria seu risco reduzido ao longo do tempo, já na escala proposta, baseada em maturidade, a incerteza diminui naturalmente ao longo do tempo, indicando um risco decrescente conforme o projeto avança. Uma estagnação neste sentido ou até um retrocesso é um alerta importante para o gerente do projeto tomar medidas e evitar o fracasso do projeto.

Fica claro então que a avaliação de maturidade deve acompanhar o ciclo de vida do projeto, e orientar a mudança de estágio. Como representado na Figura 6.1, a metodologia SRL se encaixa nas premissas do modelo *chain-linked*.

Figura 6.1 – Modelo *chain-linked* incluindo as restrições no nível de maturidade.

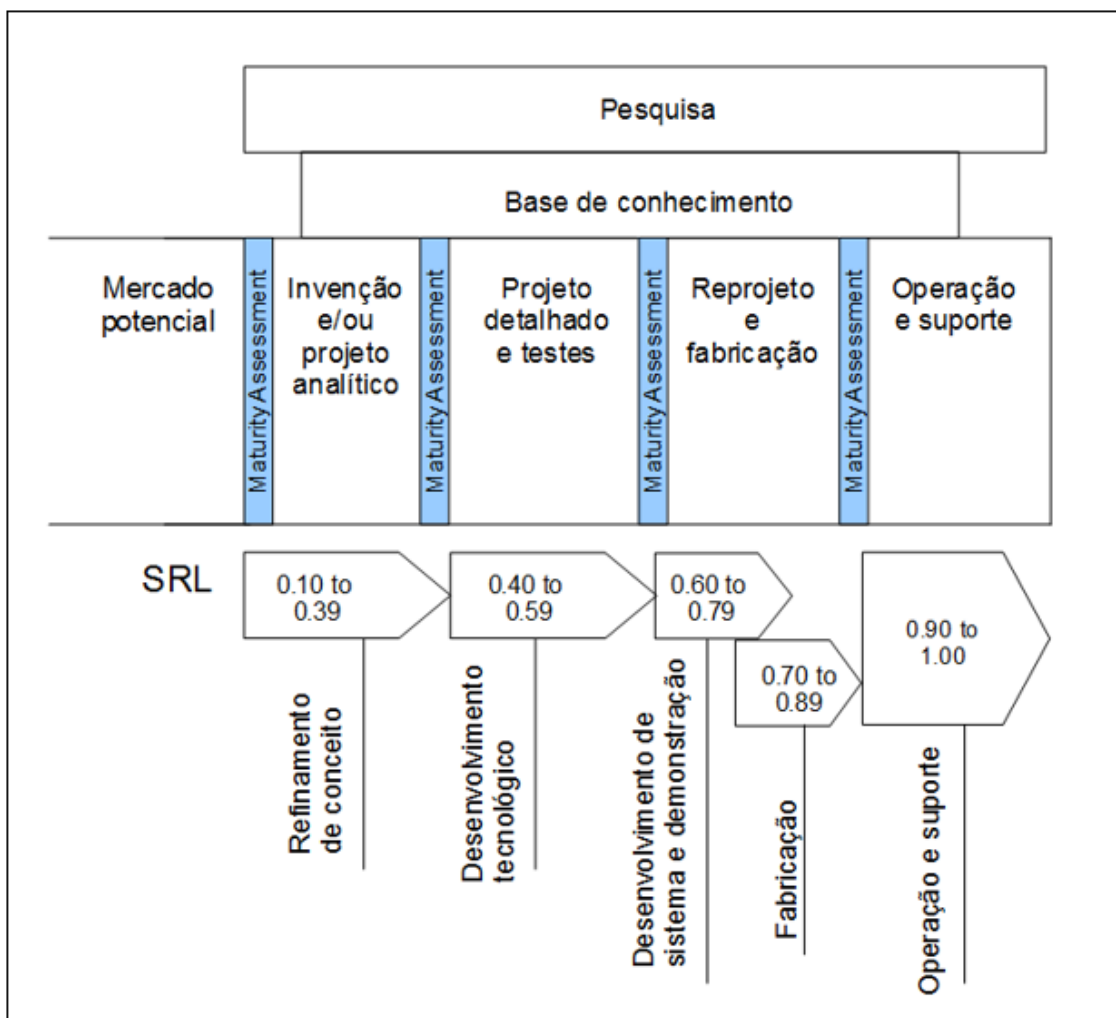


Fonte: Lemos e Chagas Júnior (2016).

O índice do SRL representa a evolução do ciclo de vida do projeto. Avaliações de maturidade garantem uma transição segura entre as fases. As soluções tecnológicas maduras e disponíveis na organização são sua base de conhecimento. A pesquisa representa o processo de aumento da maturidade de tecnologias (TRL) ou de integração (IRL).

Conforme apresentado na Figura 6.2 é possível estabelecer uma analogia entre o modelo *chain-linked* (representado aqui de forma simplificada, ocultados os fluxos de informação) e as fases do ciclo de vida propostas por Sauser *et al.* (2008) pela comparação dos valores de SRL.

Figura 6.2 – Relação entre SRL e os estágios do processo de inovação



Fonte: Lemos e Chagas Júnior (2016).

Os resultados dos estudos de casos indicam que a maturidade sistêmica pode orientar o gerente de projeto nas passagens de fase no processo de inovação, inclusive apontando a necessidade de retrocesso a estágios anteriores em alguns casos, para modificação de requisitos.

Os resultados dos estudos de caso demonstram a validade da comparação das fases do processo de inovação com os valores de SRL das fases do ciclo de vida.

A arquitetura do CBERS 1 e 2 não precisa de mudanças para garantir a operação conforme esperado. Sendo assim, esta arquitetura se apresenta no estágio de operação e suporte.

Já a arquitetura do CBERS-2B se apresentava pronta para iniciar o estágio de fabricação e montagem em 2004, sendo que, neste ponto, o desenvolvimento e demonstração ocorre concomitante com o início da fabricação. Retroceder o projeto ao estágio de desenvolvimento tecnológico era desnecessário, como é possível verificar na Figura 6.2.

Os resultados do VSB-30 indicam que este possui uma arquitetura de um produto pronto para operação. Essa arquitetura é capaz de alimentar a organização com informações relevantes do ambiente operacional, ampliando a base de conhecimento e a capacitação para projetos futuros.

Outro ponto favorável ao uso do método de maturidade como indicador da complexidade é o fato de que essa técnica pode ser utilizada tanto como uma escala objetiva para decisões gerenciais, como de uma forma mais subjetiva para verificar possibilidades de melhoria.

No estudo de caso do VSB-30, a partir do conhecimento gerado no meio operacional, reduzimos os valores de IRL dos pares tecnológicos relevantes na trajetória final do foguete. Estes pares poderiam ter IRL 9 em uma análise mais objetiva. Porém essa redução forçada permitiu identificar as relações críticas para melhor entendimento da trajetória, e incrementar o desempenho do foguete.

A redução forçada da maturidade do VSB-30 indica que não é necessário retroceder à estágios anteriores para a organização aproveitar a oportunidade de melhoria na dispersão do ponto de impacto. Se esta oportunidade precisasse de maiores desenvolvimentos tecnológicos, a arquitetura poderia retroceder nas fases do ciclo de vida. Porém a oportunidade precisa ser considerada vantajosa pois esse retrocesso traz consigo custos.

Outro ponto importante é que a avaliação de maturidade sistêmica é capaz de transpor os limites temporais da organização baseada em projeto. Para isso é necessário considerar os fluxos de realimentação propostos no modelo *chain-linked*.

### 6.1. Críticas às metodologias TRL/IRL/SRL

O processo de avaliação de maturidade de integração representa uma proposta ainda em estudo. Nesta seção serão sugeridos pontos de melhoria para esse método. Estes pontos foram percebidos durante a realização dos estudos de caso dos capítulos 4 e 5.

As melhorias propostas representam um aumento na capacidade desta metodologia de revelar as incertezas derivadas das propriedades emergentes do sistema.

Observando os requisitos necessários para cada nível de maturidade de integração, percebe-se que são consideradas apenas relações funcionais previstas para os subsistemas. Neste método não são consideradas as interações acidentais (e muitas vezes indesejadas) entre eles.

Do estudo de caso deste trabalho, pode-se tomar por exemplo as interfaces do subsistema estrutural do CBERS-2B. Em geral apenas os níveis 1, 2, 7, 8 e 9 da escala de IRL fazem sentido nesta avaliação. Via de regra, não existe troca de informação entre a estrutura e os outros equipamentos, portanto, não é possível atender os requisitos dos níveis 3; 4; 5 e 6. É fato que pode-se traduzir estes níveis para este tipo de interação entre subsistemas com requisitos capazes de captar estes aspectos. No entanto os modelos teóricos devem ter premissas explícitas para avaliação e revisão (STERMAN, 1992).

Um exemplo importante de interferência entre subsistemas de satélites é a interferência eletromagnética (IEM), questão importante em sistemas com grande número de componentes eletrônicos que pode ainda ser agravado no

ambiente espacial. Diversos casos de falhas por IEM foram relacionados por Bedinfield *et al.* (1996) e Leach e Alexander (1995).

A IEM é alvo de uma série de testes para comprovar que os níveis de interferência entre subsistemas são seguros. Portanto este é um fenômeno muito relevante que pode ocorrer entre dois subsistemas sem relação funcional direta.

A metodologia IRL aplicada a um par de componentes tecnológicos onde a única interação entre eles é a IEM, não poderia passar do nível 2 de IRL, porém após os testes necessários saltaria para o nível 7 sem cumprir os níveis intermediários. Os processos envolvidos no desenvolvimento dos equipamentos, proteções e testes que visam evitar esse tipo de interferência deveriam então figurar como um possível caminho de maturação de integração para estas relações acidentais.

No caso do VSB-30, parte dos subsistemas apresenta apenas conexão física, porém esse acoplamento é altamente complexo pelos níveis elevados de velocidade, temperatura, vibração e esforços mecânicos.

Sauser (2007) prevê que um par de tecnologias deve ser avaliado como nível 9 de IRL se uma das seguintes condições forem atendidas:

- a) a tecnologia é totalmente compatível com o sistema total;
- b) não há interferência entre os elementos;
- c) a integração não requer modificações nos elementos individuais ou;
- d) não é necessário desenvolvimento da integração dos elementos.

No entanto, em um sistema todos os componentes influenciam os demais, mesmo que essa influência não seja suficiente para demandar alterações nas tecnologias ou um esforço de desenvolvimento da integração. A soma desse

grande número de variáveis envolvidas na operação de um sistema complexo diminuem a previsibilidade do desempenho aumentando o risco.

Outra limitação encontrada nas ferramentas de avaliação de maturidade TRL e IRL, é que não há definição explícita de retrocessos em termos de níveis de maturidades. Nos estudos de caso percebemos que os pontos que retrocederam ao sofrer adaptações ainda ficam sem uma fronteira definida sobre qual tipo de alteração causaria uma redução de IRL e a qual nível de IRL esta redução seria.

O sistema estrutural do CBERS-2B, por exemplo, sofreu pequenas modificações em relação ao CBERS-2 para fixação da câmera HRS e do DDR, além de pequenas alterações de distribuição de massa. Neste trabalho foi considerado que estas modificações, por não acarretarem novos requisitos de integração e não necessitarem novos testes, não sofreram redução de valores de TRL ou IRL em relação ao CBERS-2, porém, novamente, estas premissas não estão explícitas no modelo IRL.

Já os subsistemas que receberam componentes novos foram definidos a partir de requisitos de integração já estabelecidos e do conhecimento adquirido nos satélites anteriores, além da evolução tecnológica natural do mercado. Porém, a inclusão de componentes novos necessitava ainda de verificação e validação no sistema completo, retrocedendo ao nível 6 de IRL. Outras reduções foram definidas com base nas descrições dos níveis sem haver contudo orientação clara para estes casos.

O estudo de caso do Capítulo 5 demonstra que o método IRL abre espaço para retrocessos que geram oportunidades. O foguete VSB-30 poderia em um momento anterior, ter um nível de SRL maior, porém uma evidência como a apresentada no estudo, pode indicar o rebaixamento de alguns pontos de IRL sem contudo indicar que o produto teve alguma perda de eficiência operacional, pelo contrário, esse rebaixamento indica que o conhecimento da organização em relação ao comportamento do sistema no ambiente

operacional cresceu, dando espaço para melhorias que geram uma eficiência ainda maior.

## **6.2. Crítica à abordagem adaptativa**

Na forma como o uso da abordagem adaptativa é proposta por Shenhar e Dvir (2010) o gerenciamento tradicional é indicado após o congelamento dos requisitos e dos planos, conforme apresentado na Figura 2.4.

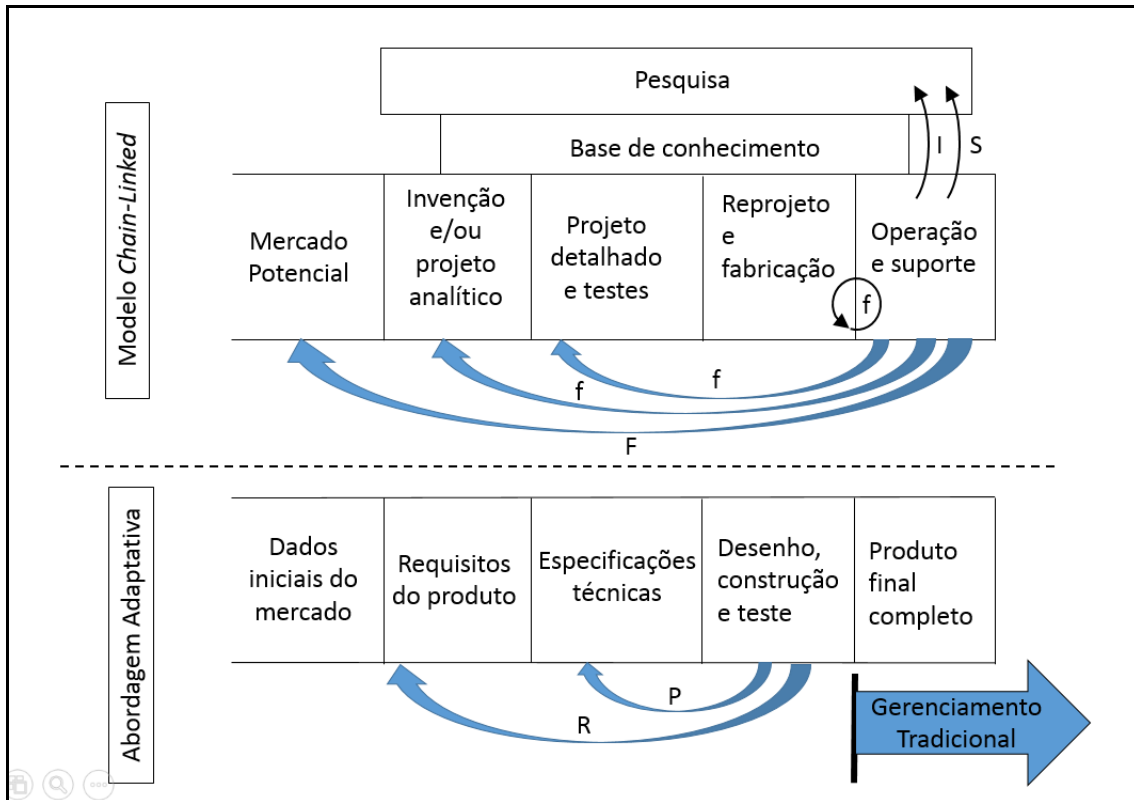
No entanto, os resultados dos estudos de caso desta pesquisa mostram como a avaliação de risco continua sendo proveitosa nas fases finais do desenvolvimento.

O modelo *chain-linked* revela como as informações obtidas no ambiente operacional alimentam a base de conhecimento dos especialistas e a prospecção de novos mercados.

Na Figura 6.3 é apresentada uma comparação entre o modelo chain-linked e a abordagem adaptativa. Nesta comparação estão representados os fluxos de aprendizado que são possíveis durante a operação de um produto conforme o modelo chain-linked e o processo iterativo da abordagem adaptativa (descrita na seção 2.3.1.6).



Figura 6.3 – Comparação entre o modelo chain-linked e a abordagem adaptativa.



Fonte: Produção do autor.

O gerenciamento tradicional não tem como foco estes processos de aprendizado apresentados nesta comparação. Um produto que atende a restrição tripla (escopo; prazo e orçamento) não precisa ser reavaliado neste ponto. Também não se leva em conta retrocessos utilizando a abordagem tradicional, ou seja, considerando a restrição tripla.

Os fluxos de aprendizado vindos do ambiente operacional são especialmente importantes no ambiente aeroespacial. Sistemas aeroespaciais são produtos de alta tecnologia agregada e produção em pequenos lotes ou produtos únicos.

No caso do VSB-30, mesmo com o produto final completo e certificado, podemos modificar requisitos para uma melhor eficiência operacional. Esta oportunidade é de difícil percepção com o gerenciamento tradicional, pois o VSB-30 na situação atual já atende à restrição tripla e não precisaria de reavaliações ou retrocessos.

Já no caso do CBERS-2B percebe-se uma mudança de planos cuja necessidade foi avaliada tendo em vista cronogramas de outros projetos e requisitos de alto nível na organização. A percepção desta necessidade de mudança de planos seria inacessível se aplicado somente o gerenciamento tradicional, pois não haveria realimentação de informações do ambiente operacional.

## 7 CONCLUSÕES

O gerenciamento de projeto necessita de uma evolução constante de suas ferramentas de avaliação de risco. O modelo proposto neste trabalho toma como base um modelo proeminente, o NTCR. O refinamento proposto neste trabalho insere as escalas de maturidade IRL e TRL que quando multiplicados permitem a avaliação do SRL, ou seja permite a avaliação do nível de incerteza sistêmica do projeto.

Esse refinamento proporcionou uma discussão sobre a natureza da complexidade e seus reflexos em um projeto de sistema.

O modelo da inovação *chain-linked* também foi utilizado como referencial teórico para demonstração da validade da aplicação das escalas de maturidade.

O conceito de organização baseada em projetos também é levado em conta como uma forma de organização adequada a ambientes incertos, como os projetos da indústria aeroespacial.

Dessa forma o modelo proposto continua com quatro dimensões de avaliação, mas as escalas das dimensões “tecnologia” e “complexidade” foram alteradas. As novas escalas são baseadas em maturidade tecnológica (TRL) e de integração (IRL) respectivamente.

Uma dimensão derivada surge desta modificação, sua escala representa a maturidade sistêmica (SRL). Esta dimensão recebeu a denominação “arquitetura”.

Os resultados do estudo de caso do projeto CBERS-2B demonstraram a necessidade de avaliações das maturidades IRL, TRL e SRL, permitindo a identificação de riscos do projeto. O valor encontrado refletiu a condição real do satélite no período considerado.

O estudo de caso do foguete VSB-30 demonstrou como a avaliação de maturidade pode ser usada em um projeto que se encontra na fase de operação. A redução forçada de maturidade para buscar melhores requisitos de desempenho aponta para os pontos críticos de desenvolvimento.

Este estudo não pretende excluir a importância do eixo hierárquico do modelo diamante original para outras situações ou organizações cujos projetos possuam maior variação de escopo.

No entanto, o refinamento realizado neste trabalho entrega um modelo capaz de atender necessidades de gerenciamento de risco de projetos aeroespaciais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R. P. A construção do conceito de incerteza: uma comparação das contribuições de Knight, Keynes, Shackle e Davidson. **Nova Economia**, v. 21, n. 2, p. 171-195, 2011. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-63512011000200001](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-63512011000200001)>. Acessado em: 8 de março de 2016.

BAR-YAM, Y. General Features of Complex Systems. In: KIEL, L. D. (Ed.). **Knowledge management, organizational intelligence and learning, and complexity**. 1 Ed. Oxford, United Kingdom: EOLSS - Encyclopedia Of Life Support Systems, UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, v.1, 2009. ISBN 978-1-905839-11-7.

BAR-YAM, Y. **Dynamics of complex systems**. Perseus books, Cambridge, MA, USA. 2003.

BEDINGFIELD, K. L.; LEACH, R. D.; ALEXANDER, M. B. **Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment**. NASA Reference Publication 1390. NASA : MSFC, Alabama, 1996. Disponível em: <[http://maelabs.ucsd.edu/mae155/classes/wi\\_05/space%20envt\\_nasa%20rp1390.pdf](http://maelabs.ucsd.edu/mae155/classes/wi_05/space%20envt_nasa%20rp1390.pdf)>. Acessado em: 13 de novembro de 2015.

BOULDING, K. E. General systems theory – the skeleton of science. **Management Science**, v. 2, n. 3, p.197-208, 1956.

CÂMARA, G. **The CBERS programme**. 2010. Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/present/cbers\\_overview.ppt](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/present/cbers_overview.ppt)>. Acessado em: 26 de outubro de 2015.

CHAGAS JÚNIOR, M. F.; CAMPANÁRIO, M. A. Systems architecture, procedural knowledge and learning by using: implications on systems integration capabilities. **Brazilian Administration Review**, v. 11, n. 1, 2014. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1807-76922014000100002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1807-76922014000100002). Acessado em: 26 de fevereiro de 2015. ISSN: 1807-7692, DOI: S1807-76922014000100002.

CHAGAS JUNIOR, M. F. ; SATO, C. Explorando limitações da aplicação do modelo NTCR a projetos de sistemas complexos. In: ALTEC, 15., 2013, PORTO (PORTUGAL). **Novas Condições para o desenvolvimento cinético, tecnológico e industrial**, 2013.

cicmil, s. et al. rethinking project Management: Researching the actuality of projects. **International Journal of Project Management**, v. 24, n. 8, p. 675-686, 2006. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786306001244>>.  
Acesso em: 3 de novembro de 2014.

CRAWFORD, J. K.; CABANIS-BREWEN, J. Competências e Carreiras em Gerenciamento de Projetos. In: DINSMORE, P. C.; CABANIS-BREWEN, J. (Ed.). **AMA - manual de gerenciamento de projetos**. 2, cap. 18, ISBN 9788574525914, 2014.

CRAWFORD, L.; HOBBS, J. B.; TURNER, J. R. **Project categorization systems: aligning capability with strategy for better results**. Newtown Square, U.S: Project Management Institute, Inc. ISBN 9781930699380, 2005.

U.S. Department of Defense (DoD). **Mandatory procedures for major defense acquisition programs (MDAPS) and major automated information system (MAIS) acquisition programs**. D.o.D. Washington D.C. 2002. DOI: 10.1016/j.ijproman.2006.08.006. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786306001244>>.  
Acessado em: 14 de agosto de 2014.

DONALDSON, L. **The contingency theory of organizations**. Thousand Oak, CA: Sage Publications Inc., 2001. ISBN 0761915737.

ENGWALL, M. No project is an island: linking projects to history and context. **Research Policy**, v. 32, n. 5, p. 789-808, Mai 2003. ISSN 0048-7333.  
Disponível em: <  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733302000884> >  
Acessado em: 5 de maio de 2015.

EPIPHANIO, J. C. N. CBERS: estado atual e futuro. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., Natal, Brasil. **Anais...INPE**, São José dos Campos, 2009, p.2001-2008. Disponível em:  
<<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.12.46/doc/2001-2008.pdf>>. Acessado em: 9 de outubro de 2015

\_\_\_\_\_. CBERS-3/4 potencialidades e aplicações. XV Simpósio de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15., Curitiba, PR, Brasil. **Anais...INPE**, São José dos Campos, 2011, p.9009-9016. Disponível em: <  
<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1222.pdf>>. Acessado em: 9 de outubro de 2015

FERREIRA, A. B. H.; FERREIRA, M. B.; DOS ANJOS, M. **Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa**. Editora Positivo, 2009. Disponível em:  
<<https://books.google.com.br/books?id=mMm6twAACAAJ>>. Acessado em 14 de março de 2016.

FORSBERG, K.; MOOZ, H.; COTTERMAN, H. **Visualizing Project Management: Models and Frameworks for Mastering Complex Systems**. 3ª ed. 2005. 480 págs. Hoboken: John Wiley & Sons Inc. ISBN 978-0-471-64848-2.

GABBAI, J. M. E. **Complexity and the aerospace industry: understanding emergence by relating structure to performance using multiagent systems**. 2005. 250 (Doutorado). Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Manchester, Manchester. Disponível em: <<http://gabbai.com/files/J%20M%20E%20Gabbai%20EngD%20Thesis.pdf>>. Acessado em: 14 de março de 2016.

U.S. Government Accountability Office (GAO). **Better management of technology development can improve weapon system outcomes**. Document Number: GAO/NSIAD-99-162 (GAO), Washington D.C., G.A.O., 1999. Disponível em: <<http://www.gao.gov/assets/160/156673.pdf>>. Acessado em: 9 de abril de 2015.

GARCIA, A. et al. VSB-30 sounding rocket: history of flight performance. **Journal of Aerospace Technology and Management**. v. 3, n. 3, p. 325-330, 2011. Disponível em: <[http://elib.dlr.de/74326/1/VSB-30\\_performance\\_history.pdf](http://elib.dlr.de/74326/1/VSB-30_performance_history.pdf)>. Acessado em 14 de setembro de 2015. DOI: 10.5028/jatm.2011. 03032211

HEINEY, A. **Lending a hand, an arm...and a boom**. 2005. Disponível em: <[http://www.nasa.gov/missions/shuttle/journal\\_jan.html](http://www.nasa.gov/missions/shuttle/journal_jan.html)>. Acesso em: 14/03/2016.

HOBDAY, M. Product complexity, innovation and industrial organization. **Research Policy**. n. 26, p. 689-710, 1998.

HOBDAY, M.; Rush H.; Tidd, J. Innovation in complex products and system. **Research policy**, n. 29, p. 793-804, 2000.

Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). **Experimento com foguete suborbital brasileiro é realizado pela primeira vez na Europa**. São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://www.iae.cta.br/noticias/2015/02/372/Experimento+com+foguete+suborbital+brasileiro+%C3%A9+realizado+pela+primeira+vez+na+Europa.html>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2015.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Final design data package**. Número do Relatório: CB-REV-15-2B/00. INPE, São José dos Campos. 2007 (Documento Interno de acesso restrito).

\_\_\_\_\_. **10 anos do lançamento do CBERS-1.** 2009a. Disponível em: < [http://www.cbbers.inpe.br/noticia.php?Cod\\_Noticia=1978](http://www.cbbers.inpe.br/noticia.php?Cod_Noticia=1978) >. Acesso em: 26 de outubro.

\_\_\_\_\_. **CBERS-2 encerra vida útil.** 2009b. Disponível em: < [http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=1733](http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=1733) >. Acesso em: 26 de outubro.

\_\_\_\_\_. **CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos terrestres - Lançamento CBERS-1.** 2011a. Disponível em: <[http://www.cbbers.inpe.br/sobre\\_satelite/lancamento\\_cbbers1.php](http://www.cbbers.inpe.br/sobre_satelite/lancamento_cbbers1.php) >. Acesso em: 26 de outubro de 2015.

\_\_\_\_\_. **CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres - Lançamento CBERS-2.** 2011b. Disponível em: < [http://www.cbbers.inpe.br/sobre\\_satelite/lancamento\\_cbbers2.php](http://www.cbbers.inpe.br/sobre_satelite/lancamento_cbbers2.php) >.

\_\_\_\_\_. **INPE/CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres.** 2014. Disponível em: < <http://www.cbbers.inpe.br/hotsite/> >. Acesso em: 26 de outubro de 2015.

\_\_\_\_\_. **CBERS - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres - Histórico.** 2015. Disponível em: < [http://www.cbbers.inpe.br/sobre\\_satelite/historico.php](http://www.cbbers.inpe.br/sobre_satelite/historico.php) >. Acesso em: 26 de outubro de 2015.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION (ISO). **Space systems** - Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment. ISO 16290:2013. 2013.

JOHNSON, N. F. **Simply complexity:** a clear guide to complexity theory. Oneworld Publications, 2009. ISBN 9781851686308.

KLINE, S. J. **Research, invention, innovation and production:** models and reality. Stanford: Thermodynamics Division, Dept. of Mechanical Engineering, Stanford University, 1985.

KLINE, S. J.; ROSENBERG, N. An overview of Innovation. In: (Ed.). Landau, R. & Rosenberg, N. (eds.), **The positive sum strategy:** harnessing technology for economic growth. Washington D.C.: National Academy Press, 1986. p.275–305. Disponível em: <[ftp://ftp.ige.unicamp.br/pub/CT010/aula%202/KlineRosenberg\(1986\).pdf](ftp://ftp.ige.unicamp.br/pub/CT010/aula%202/KlineRosenberg(1986).pdf)>. Acessado em: 20 de maio de 2015.

KNIGHT, F. H. **Risk, uncertainty and profit.** Boston, New York: Houghton Mifflin Company, 1921.



KWASNIK, B. H. The role of classification structures in reflecting and building theory. In: ASIS SIG/CR Classification Research Workshop, 3., 1992, Pittsburgh. PA. **Proceedings...** Disponível em: <<http://journals.lib.washington.edu/index.php/acro/article/view/12597>> . Acessado em: 14 de março de 2016.

LAWRENCE, P. R.; LORSCH, J. W. **Organization and environment: managing differentiation and integration.** Homewood, Illinois: Richard D. Irwin, INC., 1969.

LEACH, R. D.; ALEXANDER, M. B. **Electronic systems failure and anomalies attributed to electromagnetic interference.** Alabama: NASA Reference Publication 1374. 1995. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960009442.pdf>>, acessado em: 13 de novembro de 2015.

LEMO, J.C.; CHAGAS JÚNIOR, M. F. Application of maturity assessment tools in the innovation process: converting system's emergent properties into technological knowledge. **Revista de Administração e Inovação (RAI)**, v.14, 2016. No prelo.

LOCH, C. H.; DEMEYER, A.; PICH, M. **Managing the unknown: a new approach to managing high uncertainty and risk in projects.** 1. ed. John Wiley & Sons, Inc, 2006. 304 ISBN 978-0-471-69305-5.

LUNDIN, R. A.; SÖDERHOLM, A. A theory of the temporary organization. **Scandinavian Journal of Management**, v. 11, n. 4, p. 437-455, 12// 1995. ISSN 0956-5221. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/095652219500036U>> . Acessado em: 5 de maio de 2015

MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: a retrospective. **Acta Astronautica**, v. 65, issue 9-10, pág. 1216-1223. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576509002008>>. Acessado em: 4 de agosto de 2015.

MELKONIAN, T.; PICQ, T. Building project capabilities in PBOs: lessons from the french special forces. **International Journal of Project Management**, v. 29, n. 4, p. 455-467, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263786311000032>>. Acessado em: 14 de Março de 2016.

NASA. **Space technology 5 - about ST-5.** 2006. Disponível em: <<http://nmp.jpl.nasa.gov/st5/ABOUT/about-index.html>>. Acesso em: 14 de março de 2016.

\_\_\_\_\_. **SOFIA overview**. 2010. Disponível em: <[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/SOFIA/overview/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/SOFIA/overview/index.html)>. Acesso em: 14 de março de 2016.

\_\_\_\_\_. **Kepler: about the mission**. 2013. Disponível em: <<http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/>>. Acesso em: 14/03/2016.

PALMERIO, A. F. et al. Results from the first flight of the VSB-30 sounding rocket. In: 17th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Sandefjord, Norway. **Proceedings...** Noordwijk, The Netherlands: ESA, 2005. (ESA/SP-590).

PALMÉRIO, A. F. et al. The development of the VSB-30 sounding rocket vehicle. In: ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, 16., 2003, Sankt Gallen, Switzerland. **Proceedings...** Noordwijk : ESA Publications Division, 2003.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). **A guide to the project management body of knowledge: PMBOK guide**. 3. ed. Newtown Square, PA: Project Management Institute, Inc., 2004. 390 s. ISBN 193069945X (m) 1930699506 (CD-ROM).

\_\_\_\_\_. **A guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBOK guide**. 4. ed. Newtown Square, Pa.: Project Management Institute. 2008. 467 s.

\_\_\_\_\_. **A guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBOK guide**. 5. ed. Newtown Square, Pa.: Project Management Institute. 2013.

ROSENBERG, N. **Por dentro da caixa preta**. Campinas: Editora UNICAMP, 2006. ISBN: 9788526807426.

SAUSER, B. et al. Integration maturity metrics: development of an integration readiness level. **Information Knowledge Systems Management**, v. 9, p. 17-46, 2010. Disponível em: <[http://personal.stevens.edu/~bsauser/SysDML/Evolution\\_Lifecylce\\_Managem ent\\_files/Sauser%20IKSM%202010.pdf](http://personal.stevens.edu/~bsauser/SysDML/Evolution_Lifecylce_Managem ent_files/Sauser%20IKSM%202010.pdf)> . Acessado em: 9 de abril de 2015.

SAUSER, B. J. **System maturity metrics for decision support in defense acquisition** . Picatinny Arsenal, NJ: U.S. Army Armament Research Development Engineering Center (ARDEC), 2007. Disponível em: <[http://personal.stevens.edu/~bsauser/SysDML/Sponsored\\_Research\\_files/Sys tem%20Readiness%20Level%20Guide.pdf](http://personal.stevens.edu/~bsauser/SysDML/Sponsored_Research_files/Sys tem%20Readiness%20Level%20Guide.pdf)>. Acessado em: 9 de abril de 2015.

SAUSER, B. J. et al. Defining an integration readiness level for defense acquisition. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE), 19., 2009, Singapore.

**Proceedings...** INCOSE, 2009. Disponível em:  
<[http://personal.stevens.edu/~bsauser/SysDML/Evolution\\_Lifecylce\\_Managem ent\\_files/Sauser%20INCOSE%202009.pdf](http://personal.stevens.edu/~bsauser/SysDML/Evolution_Lifecylce_Managem ent_files/Sauser%20INCOSE%202009.pdf)>. Acessado em: 9 de abril de 2015.

SAUSER, B. J. et al. System maturity indices for decision support in the defense aquisition process. In: ANNUAL ACQUISITION RESEARCH SYMPOSIUM OF THE NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, 5., 2008, Monterey, CA. **Proceedings...** Monterey, Naval Postgraduate School, 2009. Disponível em: <<http://calhoun.nps.edu/bitstream/handle/10945/33278/NPS-AM-08-030.pdf?sequence=3>>. Acessado em: 9 de abril de 2015.

SHENHAR, A. J.; DVIR, D. Toward a typological theory of project management. **Research Policy**, v. 25, p. 607-632, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0048733395008772>>. Acessado em: 15 de setembro de 2015.

\_\_\_\_\_. **Reinventando gerenciamento de projetos**, A abordagem diamante ao crescimento e inovação bem-sucedidos. Harvard Business School Press, 2010.

SHENHAR, A. J. et al. Toward a NASA-specific project management framework. **Engineering Management Journal**, v. 17, n. 4, p. 8-16, 2005. Disponível em: <<http://www.worldsofsystems.com/downloads/2005ShenharetalEMJ.pdf>>. Acessado em: 15 de setembro de 2015.

SHENHAR, A. J.; WIDEMAN, R. M. **Optimizing success by matching management style to project type**. Vancouver BC: AEW Services, 2002. Disponível em: <[www.maxwideman.com/papers/success/success.pdf](http://www.maxwideman.com/papers/success/success.pdf)>. Acesso em: 13 de dezembro de 2015.

SIMON, H. A. **Rational decision making in business organizations**. Nobel Memorial Lecture 1978. Disponível em: <[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/economic-sciences/laureates/1978/simon-lecture.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1978/simon-lecture.pdf)>. Acessado em: 14 de março de 2016.

\_\_\_\_\_. **The sciences of the artificial**. 3. ed. MIT Press, 1996. ISBN 9780262193740.

STERMAN, J. D. **System dynamics modeling for project management**. MIT Sloan School of Management, 1992.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 290 ISBN 978-85-8260-231-7.

ZANDI, I. Science and engineering in the age of systems. In: INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEM ENGINEERING (INCOSE), 2000, San Diego.

**Proceedings...** 2000. Disponível em:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.556.4174&rep=rep1&type=pdf>>. Acessado em: 20 de novembro de 2014.