



MODELO PARA AVALIAÇÃO DA MATURIDADE DE FABRICAÇÃO APLICADA À INDÚSTRIA ESPACIAL BRASILEIRA

MANUFACTURING READINESS ASSESSMENT MODEL APPLIED TO BRAZILIAN SPACE INDUSTRY

Marcílio Antônio Fernandes de Andrade¹

Antônio Ramalho de Souza Carvalho²

Francisco Cristovão Lourenço de Melo³

Resumo

A indústria espacial é caracterizada por fabricar produtos intensivos em capital e que operam em ambiente agressivo. Por esse motivo é fundamental que a estrutura de fabricação garanta a confiabilidade dos produtos espaciais e que o processo de industrialização seja bem conduzido, antecipando questões relativas à fabricação ainda na etapa de desenvolvimento do produto, auxiliando na redução dos tempos e dos custos relacionados aos programas espaciais. Identificou-se que não existe um modelo para avaliação da maturidade de fabricação aplicado à realidade da indústria espacial brasileira de forma a tornar mais eficaz o processo de industrialização de um dado produto espacial. Dentro deste contexto, o objetivo do trabalho é validar a adaptação de um modelo para avaliação do nível de maturidade de fabricação aplicado à realidade da indústria espacial brasileira. Utilizou-se como ponto de partida o modelo desenvolvido pelo Departamento de Defesa norte americano denominado MRL (*manufacturing readiness level*), ou nível de maturidade de

¹ Engenheiro Mecânico (Ênfase Mecatrônica) pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2000), Mestre em Ciências e Tecnologias Espaciais na Área de Gestão Tecnológica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2018). Atualmente é doutorando em Ciências e Tecnologias Espaciais na Área de Gestão Tecnológica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica e Tecnologista Pleno do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, atuando principalmente nos seguintes temas: gestão, estratégia, gestão de projetos, PDCA e tecnologia. E-mail: marcilioandrade@me.com

² Doutor em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Mestre em Gestão e Desenvolvimento Regional pela Universidade de Taubaté (UNITAU). Bacharel em Administração de Empresas. Atuou como Pesquisador-colaborador no ITA, de 2016 a 2019, estudando e contribuindo com o desenvolvimento da gestão de projetos das Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICT) do Comando da Aeronáutica e sociedade. Servidor público federal de carreira do Comando da Aeronáutica, na função de Assessor em Gestão Estratégica de Projetos de PD&I. Professor efetivo da Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP) em São José dos Campos, onde coordena o curso de Gestão Estratégica de Projetos e ministra disciplinas voltadas para a gestão de projetos, metodologias ágeis e design thinking. E-mail: ramalhosjc@gmail.com

³ Doutor em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo. Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. Graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. É pesquisador Titular III do Instituto de Aeronáutica e Espaço e professor colaborador do Instituto Tecnológico de Aeronáutica no Programas de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia Espacial (CTE/ITA). Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Materiais Cerâmicos e Vitrocerâmicos e na área de Gestão Tecnológica, atuando principalmente nos seguintes temas: blindagem balística, sinterização, carbetos de boro, ferritas cerâmicas, planejamento estratégico e gestão da inovação. Atualmente ocupa o cargo de Chefe do Escritório de Estratégia Tecnológica do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). E-mail: frademelo@gmail.com

fabricação. A validação do modelo adaptado deu-se na aplicação da metodologia em duas organizações da indústria espacial brasileira na fabricação do veículo espacial VSB-30. O resultado mostrou que ambas organizações alcançaram nível 4 de maturidade de fabricação, abaixo do nível 9 desejado. Tal situação explicitou riscos que, caso não tratados, podem impactar negativamente o processo de industrialização do veículo. A efetividade do modelo adaptado foi confirmada pelo alcance do objetivo de forma satisfatória.

Palavras-chave: Gestão Tecnológica, Maturidade de Fabricação, Maturidade Tecnológica, MRL, Gestão de Riscos.

Abstract

Space industry is characterized by manufacturing capital intensive products which operate in an aggressive environment. For this reason, it is fundamental that the manufacturing structure ensures the reliability of space products. Also, industrialization process need to be well conducted, anticipating manufacturing issues yet in the product development stage, helping to reduce time and costs related to the space programs. It was identified that there is no model to assess the manufacturing maturity applied to the reality of the Brazilian space industry in order to make the industrialization process of a given space product more efficient. So, the objective of this work is to validate an adaptation of a model for manufacturing readiness level assessment applied to the reality of the Brazilian space industry. The model developed by the US Department of Defense called MRL (manufacturing readiness level) was used as a starting point. The validation of the adapted model occurred by application of the methodology in two Brazilian space industry organizations in the manufacture of the VSB-30 space vehicle. The result showed that both organizations reached level 4 of manufacturing readiness, below the desired level 9. This situation presented 21 risks that, if untreated, could negatively impact the VSB-30 industrialization process in 8 manufacturing areas. The effectiveness of the adapted model was confirmed by the objective achievement satisfactorily. As an additional contribution, the research developed a tool to assess manufacturing readiness, called the MRL DCTA/ITA-2018-1 Calculator, in order to standardize assessment and make it more agile

Keywords: Technological Management, Manufacturing Readiness, Technology Readiness, MRL, Risk Management.

Introdução

O setor espacial é caracterizado por fornecer produtos de alto valor agregado, gerar empregos altamente qualificados e possuir um importante potencial de fortalecimento de outras cadeias produtivas pelo seu caráter multiplicador de formação de mão de obra e desenvolvedor de tecnologias de ponta (DIEESE, 2011). Além disso, é uma indústria que movimentou 335 bilhões de dólares em 2016, e vem experimentando crescimentos constantes desde 2006 (SIA, 2017). Ou seja, além de representar uma parcela nobre da estrutura produtiva de um país, em termos de capacitação de recursos humanos e de desenvolvimento de tecnologias críticas, também se apresenta como um importante negócio em termos econômicos, dado seu perfil robusto de crescimento.

As atividades espaciais fazem parte da mesma cadeia produtiva aeronáutica e de defesa (DIEESE, 2011), formando o setor aeroespacial brasileiro, responsável por gerar uma contribuição sócio econômica para o país de 22.100 empregos formais e 7,4 bilhões de dólares em receitas, dados de 2016 (AIAB, 2019). A Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte ou RMVale, composta por 39 municípios, acolheu a origem do setor em 1945 com a fundação do CTA, então Centro Tecnológico da Aeronáutica, e ainda hoje abriga as suas principais organizações como a Embraer, a Avibrás, o DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial), O INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), além de sediar associações de empresas como a AIAB (Associação das Indústrias Aeroespaciais do Brasil) e o Cluster Aeroespacial Brasileiro (LUZ; MINARI; SANTOS, 2010).

Dada a importância do setor em termos nacionais e regionais, entende-se que é necessário fortalecer a indústria espacial brasileira, porém deve-se mapear sua capacidade de absorção das tecnologias para otimizar os recursos a serem utilizados na execução dessa estratégia.

Uma etapa crucial do processo da gestão tecnológica é a transição de uma nova tecnologia desenvolvida em ambiente laboratorial para o início de produção seriada. É a chamada etapa de industrialização. Segundo o Comando da Aeronáutica, industrialização é definida como conjunto de atividades destinadas a preparar a indústria para a produção de um dado sistema ou material (BRASIL, 2007). Ao se realizar tal transição, passa-se a tratar de questões comuns relativas ao universo da fabricação as quais não normalmente observadas em etapas prévias do desenvolvimento (FERNANDEZ, 2010), tais como: fornecedores, matéria-prima, máquinas, layouts, processos, pessoas capacitadas, etc. Implica um aumento significativo de partes interessadas e, conseqüentemente, na complexidade do desenvolvimento do processo de gestão tecnológica. Antecipar questões relativas à fabricação já nas etapas de desenvolvimento do produto, auxilia a redução do tempo e dos custos envolvidos (UNITED STATES, 2017a). Dá-se o nome de maturidade de fabricação o apronto dos fatores envolvidos na etapa de industrialização.

Diante da situação apresentada, identificou-se que não existe um modelo para avaliação da maturidade de fabricação aplicado à realidade da indústria espacial brasileira de forma a tornar mais eficaz o processo de industrialização de um dado produto espacial. Portanto, o objetivo do trabalho é validar a adaptação de um modelo para avaliação do nível de maturidade de fabricação aplicado à situação exposta.

Método

Para atingir o objetivo do trabalho, primeiramente, pesquisou-se na bibliografia e documentos oficiais, assuntos referentes modelos de avaliação da maturidade de fabricação existentes em diversas aplicações.

Após realização da pesquisa exploratória em tais assuntos, foi feita uma análise crítica do uso de tais avaliações de maturidade de fabricação, buscando pontos fortes, pontos fracos e demais direcionamentos para realizar a adaptação proposta de forma mais eficaz.

A adaptação do modelo foi feita em seguida em função da análise crítica realizada.

Por fim, para validar o modelo adaptado, foi avaliada a maturidade de fabricação de um produto espacial em desenvolvimento no Brasil, em duas organizações distintas da indústria espacial brasileira.

Modelos de avaliação da maturidade de fabricação

A pesquisa bibliográfica na base da Scopus levantou 226 artigos com o termo “maturidade de fabricação” desde 1986 até 2017. Dos 226 artigos, analisou-se 50 com base nos mais recentes e nos mais citados. A Figura 1 mostra que dos 50 artigos analisados, 27 deles usam de alguma forma em suas pesquisas o nível de maturidade de fabricação definido pelo DoD (Departamento de Defesa norte americano). Enquanto que 22 usam critérios próprios diversos para avaliar a maturidade de fabricação, grande parte em função da confiabilidade na estabilidade das funções da tecnologia avaliada. Apenas 1 artigo usou o modelo MTS (Estratégia de Transformação de Fabricação), da entidade MESA (Associação de Empresas de Soluções de Fabricação).

Figura 1. Uso de ferramentas de avaliação da maturidade de fabricação com base numa amostra de 50 artigos publicados.



O MRL definido pelo DoD é utilizado para avaliar a maturidade da fabricação de determinado sistema e respectivos riscos no que tange as tecnologias da produção, capacitação dos recursos humanos, ferramental e processos envolvidos (SANTOS; MARSHALL; DARUIZ, 2013).

É composto por 10 níveis. Cada nível corresponde a um conjunto de critérios que devem ser satisfeitos para identificar o patamar de maturidade de fabricação que determinado produto ou protótipo se enquadra. Estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição dos níveis de maturidade de fabricação (MRL)

Nível	Descrição
MRL 1	Implicações básicas de fabricação identificadas.
MRL 2	Conceitos de fabricação identificados.
MRL 3	Demonstração de conceito de fabricação desenvolvida.
MRL 4	Capacidade de produzir a tecnologia em um ambiente de laboratório.
MRL 5	Capacidade de produzir componentes de protótipo em ambiente de fabricação relevante.
MRL 6	Capacidade de produzir sistemas ou subsistemas do protótipo em ambiente de fabricação relevante.
MRL 7	Capacidade de produzir sistemas, subsistemas ou componentes em ambiente de fabricação representativo.
MRL 8	Capacidade de linha piloto demonstrada. Pronto para iniciar a produção inicial de baixa escala.
MRL 9	Produção de baixa escala demonstrada. Pronto para iniciar a produção de escala total.
MRL 10	Produção de escala total demonstrada e práticas de produção enxutas válidas.

Nota. Fonte: Recuperado de "Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook". Versão 2017 de U.S Department of Defense, 2017a.

A avaliação da maturidade de fabricação deve ser realizada desde as fases iniciais do desenvolvimento. Entende-se que quanto antes os riscos de fabricação forem identificados e tratados mais fácil será solução em termos de custo e tempo. De fato, a constatação é também firmada pelo DoD por meio do seu guia de MRL.

Além dos níveis, o MRL é composto também por 9 áreas de conhecimento da fabricação as quais podem ainda ser desdobradas. São descritas conforme *United States* (2017a):

A – Base Industrial e Tecnologia de Fabricação.

A.1 Base Industrial – referente à capacidade da base industrial em apoiar o design, desenvolvimento, produção, operação, suporte de manutenção e eventual descarte com impactos ambientais associados.

A.2 Tecnologia de Fabricação - referente ao nível de maturidade da tecnologia de fabricação em uso e avaliação da adequação dessas tecnologias no cenário atual.

B – Design.

B.1 Produtibilidade – é definida como atributos de design que permitem a fabricação e montagem de equipamento repetidamente de forma a satisfazer os objetivos funcionais e fornecer uma excelente relação de custo e dentro de programação de produção. Em outras palavras, a produtividade é relativa às características do design que facilitam a sua produção de forma alcançar os objetivos de engenharia, qualidade e custo.

B.2 Maturidade do design – basicamente avalia a estabilidade do design em relação aos testes operacionais e as necessidades eventuais de mudanças

C – Custos e Recursos Financeiros.

C.1 Conhecimento do custo de produção - é relacionado à apuração dos custos. Serve para subsidiar a administração na formação do preço de venda dos seus produtos e serviços, atender a legislação fiscal vigente, e fornecer informações gerenciais que auxiliem o processo de tomada de decisões.

C.2 Análise de custo – avalia o quanto bem a organização analisa seus custos com o intuito de buscar otimização.

C.3 Orçamento e investimento para fabricação – relativo ao orçamento e investimento disponível para produção.

D – Materiais.

D.1 Maturidade dos materiais - relativo a estabilidade das especificações das matérias-primas e insumos recebidos e utilizados no processo de fabricação.

D.2 Disponibilidade – avalia o risco relativo a eventuais faltas de matérias-primas, obsolescência de materiais e problemas de embargos.

D.3 Gestão da cadeia de suprimentos – se refere a adequação da cadeia de suprimentos aos requisitos da produção por meio da gestão dos principais fornecedores.

D.4 Manuseio especial – avalia a forma com que produtos perigosos ou nocivos ao ambiente são manuseados e armazenados.

E – Capabilidade e Controle do Processo.

E.1 Modelamento e simulação – relativo a existência de modelos de produção e se os mesmos são usados para melhorar os processos e inferir se os requisitos da produção podem ser atendidos.

E.2 Maturidade do processo de fabricação – avalia se os processos de fabricação são estáveis, adequadamente controlados, capazes e alcançam os objetivos definidos.

F – Gestão da Qualidade.

F.1 Sistema de gestão de qualidade – avalia a formalização dos processos da organização e como esses processos podem melhorar a qualidade dos produtos e serviços frente às demandas dos clientes.

F.2 Qualidade do produto – avalia a forma como são controladas as características críticas dos produtos fabricados.

F.3 Gestão da qualidade do fornecedor – é referente às práticas de gestão da qualidade dos fornecedores e como a organização audita essas práticas.

G – Pessoas.

Única área de conhecimento que não é desdobrada. Se refere às habilidades, disponibilidade e número de pessoas necessárias para apoiar diretamente o processo de fabricação.

H – Instalações.

H.1 Equipamentos e ferramentas – avalia como os equipamentos e ferramentas necessários para a fabricação do produto são gerenciados e conservados.

H.2 Infraestrutura – relativo à estrutura física de produção.

I – Gestão da Fabricação.

I.1 Planejamento e programação da fabricação – avalia a capacidade da empresa de gerenciar a sua produção por meio de planejamentos, programações e instruções de trabalho.

I.2 Planejamento de materiais – avalia a forma de gestão do planejamento dos materiais a serem usados na linha de produção.

Análise crítica do uso do MRL

O MRL é utilizado para avaliar a maturidade da fabricação do sistema e também elencar riscos no que tange as tecnologias da produção, capacitação dos recursos humanos, ferramental e processos envolvidos (SANTOS; MARSHALL; DARUIZ, 2013).

Stanley (2010) considera o MRL uma excelente ferramenta de gestão tecnológica por disciplinar o processo de desenvolvimento de sistemas tecnológicos pelo viés dos paradigmas da fabricação, por melhorar as comunicações e o alinhamento de esforços entre os principais envolvidos e por trazer as discussões com base em fatos e dados levantados.

Embora a implementação das avaliações do MRL tenha potencial para obter economias e eficiências, ela não foi amplamente adotada no DoD e seu uso encontra certa resistência, semelhante ao que foi verificado quando as avaliações de TRL foram primeiramente introduzidas (FERNANDEZ, 2010).

Outra limitação importante se refere à aplicação do modelo. Adaptar o MRL efetivamente no ambiente de C&T é provavelmente a mais desafiadora de todas as várias situações porque normalmente, os projetos financiados não vão além do esforço do desenvolvimento do protótipo. Isso coloca a comunidade de C&T em um dilema quando seu objetivo é atingir a maturidade de fabricação mais altas no momento da transição do protótipo para o produto final (UNITED STATES, 2017b).

Os critérios de MRL elaborados pelo DoD, contêm linguagem de aquisição que pode não ser relevante para os esforços de C&T, uma vez que a linguagem de aquisição é muito baseada em estimativas de orçamento, capacidade de processo e rendimentos para linha de produção. No entanto, critérios que lidam com qualidade, design, materiais, instalações e força de trabalho, são muito valiosos levando-se em consideração as circunstâncias da pesquisa. É recomendável que todos os critérios de MRL sejam interpretados para aproveitar ao máximo os benefícios da redução de risco, sem que o sistema seja penalizado por referências que não se aplicam. Em alguns casos, a interpretação pode ser de que os critérios que contêm a linguagem de aquisição não são aplicáveis à situação, pois não representam nenhum risco de fabricação (UNITED STATES, 2017b).

Portanto, o próprio DoD reconhece que adaptações ao modelo são desejáveis dependendo da aplicação.

Adaptação do MRL para uso na indústria espacial brasileira

A indústria espacial é caracterizada por baixos volumes de produção e por níveis altos de controle de qualidade em função da intensidade de capital envolvido (YASSUDA, 2013). A plataforma de avaliação da maturidade de fabricação proposta a seguir deve se adequar à tal situação e endereçar aspectos da análise crítica do uso do MRL elaborado pelo DoD.

Seguindo as recomendações do DoD para adaptações ao modelo os seguintes direcionadores foram adotados:

1) Adaptação para produtos com baixo volume de produção.

As avaliações de maturidade de fabricação devem ser adaptadas para sistemas de produção limitados (UNITED STATES, 2017a), por exemplo, radares de grande escala, navios, família de satélites, e produtos da indústria espacial. A qualidade e confiabilidade são de suma importância para tais sistemas devem ser enfatizadas (UNITED STATES, 2017a). Por outro lado, certas áreas do MRL não são totalmente úteis quando se trata da fabricação de sistemas limitados, como exemplo, capacidade de processos. A verificação de procedimentos e processos de fabricação comprovados e capazes devem ser utilizados tanto quanto possível.

2) Adaptação para uso genérico na indústria.

Especificamente no caso da avaliação MRL ser usada na indústria, *United States* (2017a) dá algumas recomendações. A indústria pode adaptar e potencializar os critérios do MRL aos seus processos. A adaptação do uso do MRL para uso genérico na indústria deve ser vista como um

elemento necessário de introdução de novos produtos da organização. Um simples passo para adaptar a ferramenta começa com a inclusão do vocabulário específica da área de forma a melhorar a compreensão e aceitação do processo de avaliação.

Portanto, para seguir o direcionador 1, sobre as características do baixo volume de produção, foram modificadas questões relativas a rendimento e ritmo de processo as quais não são críticas para a presente aplicação por se tratar de um paradigma de indústrias com altos volumes de produção.

Para seguir o direcionador 2, a respeito do uso genérico na indústria, foram modificadas questões que fazem referência a procedimentos e documentos específicos do processo de aquisição de defesa do DoD, de forma a trazer para a realidade da indústria espacial brasileira.

A Tabela 2, mostra o resumo das modificações feitas a fim de adaptar o modelo para a presente situação. O modelo original de avaliação do MRL proposto pelo DoD possui 417 questões. Foram excluídas 25 questões para seguir o Direcionador 1, foram alteradas 93 questões para seguir o Direcionador 2, e foram excluídas mais 57 questões para seguir também o Direcionador 2. Outras 242 questões não apresentaram modificações, sendo realizada apenas a adequação do vocabulário. No total, o modelo adaptado possui 335 questões.

Tabela 2: Resumo da adaptação do questionário MRL para a pesquisa

Resumo da adaptação			
Modificação	Motivo	MRL DoD	MRL Adaptado
Exclusão	Baixa escala - Direcionador 1	25	
Alteração	Uso genérico - Direcionador 2	93	93
Exclusão	Uso genérico - Direcionador 2	57	
Tradução		242	242
TOTAL		417	335

A Tabela 3 mostra a quantidade de questões por nível de MRL e por área de conhecimento, após as modificações.

Tabela 3: Quantidade de questões do MRL adaptado por nível e por área de conhecimento

MRL ADAPTADO											
Áreas de Conhecimento	Níveis										TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A - Base Industrial e Tecnologia de Fabricação		1	2	2	4	4	4	3	3	3	26
A.1 - Base Industrial			1	1	3	3	3	2	2	2	17
A.2 - Tecnologia de Fabricação		1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
B - Design	1	2	4	6	7	8	5	6	6	4	49
B.1 - Produtibilidade			1	3	2	3	1	2	2	2	16
B.2 - Maturidade do Design	1	2	3	3	5	5	4	4	4	2	33
C - Custo e Recursos Financeiros	2	3	4	6	4	4	5	5	4	4	41
C.1 - Conhecimento do Custo de Produção		1	2	2	1	1	1	1	1	1	11
C.2 - Análise de Custo	1	1	1	1	2	2	3	2	2	2	17
C.3 - Orçamento e Investimento para Fabricação	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	13
D - Materiais	1	3	6	8	9	9	8	11	8	4	67
D.1 - Maturidade dos Materiais	1	1	1	1	2	3	2	2	2	1	16
D.2 - Disponibilidade		1	1	2	2	3	3	2	2	1	17
D.3 - Gestão da Cadeia de Suprimentos			1	1	2	1	1	3	2	1	12
D.4 - Manuseio Especial		1	3	4	3	2	2	4	2	1	22
E - Capabilidade e Controle do Processo		2	3	2	3	3	3	5	3	3	27
E.1 - Modelamento e Simulação		1	1	1	1	1	1	2	2	2	12
E.2 - Maturidade do Processo de Fabricação		1	2	1	2	2	2	3	1	1	15
F - Gestão da Qualidade				3	4	6	8	8	7	4	40
F.1 - Sistema de Gestão de Qualidade				1	1	2	2	2	3	1	12
F.2 - Qualidade do Produto				1	2	3	3	3	1	2	15
F.3 - Gestão da Qualidade do Fornecedor				1	1	1	3	3	3	1	13
G - Pessoas			2	3	3	3	4	4	2	2	23
H - Instalações			1	2	4	4	4	7	5	3	30
H.1 - Equipamentos e Ferramentas				1	2	2	2	3	3	2	15
H.2 - Infraestrutura			1	1	2	2	2	4	2	1	15
I - Gestão da Fabricação				3	5	5	6	6	5	2	32
I.1 - Planejamento e Programação da Fabricação				2	2	3	4	4	3	1	19
I.2 - Planejamento de Materiais				1	3	2	2	2	2	1	13
TOTAL	4	11	22	35	43	46	47	55	43	29	335

Dessa forma, considera-se que a estrutura de avaliação se encaixa melhor às aplicações da indústria espacial e similares.

O processo de avaliação é então proposto, com base no que o DoD define como condução da avaliação da maturidade de fabricação, disposta no Guia do Nível de Maturidade de Fabricação do próprio DoD, versão de 2017. Segue as etapas:

1. Definição dos objetos da avaliação;
2. Definição da meta;
3. Definição dos avaliados;
4. Definição de agenda de visitas;
5. Condução da avaliação; e
6. Preparação do relatório.

Etapa 1 - Definição de objetos de avaliação.

Consiste em definir o responsável pela avaliação, o que será avaliado e onde a avaliação será conduzida.

O responsável pela avaliação, deve determinar de forma antecipada os possíveis desdobramentos do objeto a ser avaliado. O desdobramento pode ser obtido pela visão do produto, ou seja, nível de sistema, subsistema ou componente, ou pela visão dos processos de fabricação, com atenção aos procedimentos de montagem e testes associados.

As seguintes questões foram desenvolvidas para auxiliar na determinação dos objetos a serem avaliados. Todas tecnologias críticas e outras áreas significativas da estrutura analítica do projeto ou lista de materiais devem estar sujeitos às seguintes questões de filtragem. Qualquer resposta “sim” implica que uma avaliação da maturidade de fabricação pode ser necessária para aquele objeto.

- Materiais – existem materiais que não foram demonstrados em produtos similares ou processos de fabricação?
- Custo – é um objeto que afeta significativamente o custo? A tecnologia é nova, com alta incerteza de custo?
- Design – é um design novo? Contém arranjos fora do padrão?
- Processos de fabricação – será necessário uso de novos processos de fabricação os quais ainda não foram verificados e validados?
- Qualidade – o objeto apresenta histórico de problemas de qualidade?
- Tempo – o objeto apresenta alto tempo de provisionamento com impacto significativo na programação da produção?
- Instalações – o objeto requer novas instalações fabris ou melhorias significativas nas existentes?
- Cadeia de suprimentos – o objeto apresenta histórico de problemas com fornecedores (custo, qualidade e entrega)?
- Base industrial – O objeto apresenta base industrial com deficiências críticas ou é objeto crítico fabricado por uma fonte única ou estrangeira?

Com relação ao local de avaliação, raramente é possível visitar todos os locais de fabricação para examinar o status de seus principais processos. Alguns elementos devem ser avaliados no local e outros podem utilizar abordagens alternativas. O tipo e a profundidade da avaliação são determinados pelo nível de risco do objeto.

Etapa 2 - Definição de meta.

A determinação da meta de MRL serve tanto para o avaliador como para o avaliado identificar adequadamente o nível de risco encontrado no processo de transição da tecnologia em laboratório para o chão de fábrica. Ou seja, a meta MRL vai variar em função da fase do ciclo de vida e requisitos específicos do programa.

A correta colocação da meta de MRL dadas as circunstâncias da situação é fundamental para um robusto processo de identificação dos riscos a que se propõe a presente pesquisa. Uma meta mal colocada pode levar a não identificação de riscos importantes caso esta seja inferior ao nível adequado, ou a identificações de riscos inexistentes caso a meta seja colocada num nível superior ao nível adequado àquela situação.

Etapa 3 – Definição dos avaliados.

É um passo importante, pois os avaliados devem ter conhecimento amplo na fabricação do objeto em questão, ter visão holística da fabricação e utilizar equipe técnica especializada e outros recursos caso seja necessário o aprofundamento maior em alguma questão.

Antes de se realizar a avaliação, o responsável pela avaliação deve orientar os avaliados com relação à descrição do MRL com respectivos níveis e áreas de conhecimento, necessidade de preparo de evidências para comprovação da situação (ex: mapas de processo, plano de fabricação, dados de capacidade do processo, dados de eficiência, planos de desenvolvimento de tecnologia, planos de tratamento de riscos, etc), áreas do chão de fábrica onde visitas serão desejáveis e expectativa de tempo para conclusão completa da avaliação.

Etapa 4 – Definição de agenda de avaliação.

O responsável pela avaliação deve então, definir a agenda das visitas in loco. Visitas in loco destinam-se a fornecer uma compreensão mais detalhada do que pode ser obtida a partir de documentos. Um equilíbrio deve ser alcançado entre o tempo gasto fora e dentro das instalações do avaliado.

Etapa 5 – Condução da avaliação.

É a coleta de dados da pesquisa propriamente dita utilizando os instrumentos adequados. As habilidades do entrevistador devem ser consideradas, a partir dos seguintes fatores (YIN, 2001): ter capacidade de interpretar as respostas; ser um bom ouvinte e não trazer nenhum tipo de preconceito; estar muito bem embasado (teoricamente) no tema sendo investigado; ser receptivo e sensível a possíveis evidências contraditórias; ser adaptável e flexível às situações novas ou não previstas, considerando-as como oportunidades e não ameaças.

O processo de avaliação do MRL inicia-se, portanto, por meio do registro de todos os dados que caracterizam a avaliação, ou seja, o objeto a ser avaliado, a organização a ser avaliada, a meta de MRL definida, a equipe a participar da avaliação, o responsável pela avaliação e a data. Tais dados são importantes para identificar a avaliação na geração do relatório final.

Então, são trazidas as questões referentes a meta de MRL definida para todas as áreas de conhecimento e seus desdobramentos. Para cada questão, a resposta deve ser registrada de forma padronizada com “sim” ou “não”.

A fim de dar consistência aos dados coletados, é importante reunir todas as evidências que suportam as respostas dadas pelo avaliado, o que inclui regulamentos, planilhas, planos de ação, relatórios, padrões de procedimentos, etc.

Após o preenchimento total das respostas referentes à meta, checka-se se há áreas de conhecimento sem o cumprimento total dos requisitos. Em caso afirmativo, uma nova rodada de perguntas é trazida referente ao nível inferior àquele respondido inicialmente, somente para as áreas onde as questões não foram plenamente respondidas com “sim”.

O ciclo é retomado novamente até que não se tenha respostas “não” remanescentes. A partir desse ponto, a avaliação é finalizada e o nível de MRL apurado corresponde ao nível observado neste ponto. Ou seja, o MRL apurado é sempre o menor nível encontrado na avaliação em qualquer área de conhecimento.

Etapa 6 – Preparação do relatório.

Finalizada a avaliação, deve ser gerado um relatório com as seguintes informações:

- Dados da avaliação;
- Meta de MRL definida e MRL alcançado; e
- MRL alcançado desdobrado por áreas de conhecimento.

Validação do modelo de MRL adaptado por meio de estudo de caso

Deve-se aplicar em casos reais o modelo de MRL adaptado para verificar se o mesmo resolve o problema de pesquisa estabelecido. O estudo de caso seguinte é descrito conforme a plataforma proposta de avaliação do MRL adaptado.

Etapa 1 – Definição de Objetos de Avaliação

Com relação ao objeto a ser avaliado, levou-se em consideração a relevância do objeto em relação a motivação da pesquisa. O produto escolhido foi o VSB-30, veículo suborbital com capacidade de transportar cargas úteis científicas e tecnológicas, de até 400 kg, para experimentos na faixa de 270 km de altitude em ambiente de microgravidade, (IAE, 2018). É um produto em processo de industrialização e de alta maturidade tecnológica obtida por meio de lançamentos bem sucedidos.

Para validar a escolha, a lista de verificação fornecida para auxiliar a escolha do objeto foi preenchida com auxílio de especialistas do setor espacial. A Tabela 4 mostra o resultado com as respectivas justificativas em caso afirmativo.

Tabela 4: Checklist para validação da escolha do VSB-30 como objeto da avaliação

Perguntas para check do objeto	Respostas	Justificativas em caso afirmativo
· Materiais – existem materiais que não foram demonstrados em produtos similares ou processos de fabricação?	não	
· Custo – é um objeto que afeta significativamente o custo? A tecnologia é nova, com alta incerteza de custo?	não	
· Design – é um <i>design</i> novo? Contém arranjos fora do padrão?	não	
· Processos de fabricação – será necessário uso de novos processos de fabricação os quais ainda não foram verificados e validados?	não	
· Qualidade – o objeto apresenta histórico de problemas de qualidade?	não	
· Tempo – o objeto apresenta alto tempo de aprovisionamento com impacto significativo na programação da produção?	não	
· Instalações – o objeto requer novas instalações fabris ou melhorias significativas nas existentes?	sim	Existe a possibilidade do objeto ser fabricado em novas instalações
· Cadeia de suprimentos – o objeto apresenta histórico de problemas com fornecedores (custo, qualidade e entrega)?	sim	Identificados problemas de abastecimento de matéria-prima importante
· Base industrial – O objeto apresenta base industrial com deficiências críticas ou é objeto crítico fabricado por uma fonte única ou estrangeira?	sim	Base industrial ainda incipiente

Com relação ao local das avaliações se julgou adequado a avaliação *in loco* para auxílio na verificação das respostas dadas.

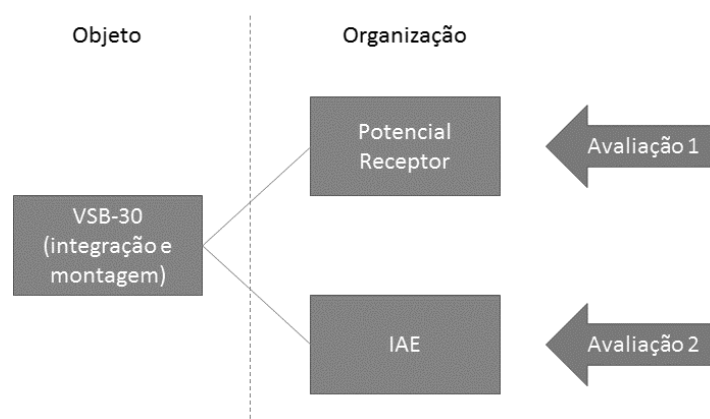
Etapa 2 – Definição da meta.

No caso da presente pesquisa, a meta de MRL mais adequada a situação é 9, ou seja, o sistema componente teve a produção inicial demonstrada e deve estar pronto para iniciar a produção em regime. A colocação da meta no nível 9 se justifica por ser o VSB-30 um produto já fabricado em baixa escala.

O nível 10 diz respeito a produção em regime e técnicas de produção aprimoradas. Para se alcançar o nível 10, entende-se que o produto deve ser fabricado numa cadência contínua para que as práticas de fabricação sejam aprimoradas. Foram produzidas apenas 23 unidades do VSB-30 desde 2004 até o momento da coleta de dados, ainda assim, de forma inconstante ao longo desse período. Não há uma previsibilidade de fabricação para as próximas unidades. Existe uma curva de aprendizado, responsável pelo aumento da eficiência de fabricação, a qual também se aplica a indústrias de baixo volume de produção. Entretanto, para se alcançar o nível 10 é necessária a cadência contínua de fabricação com um mínimo de planejamento de médio e longo prazos. Considera-se, portanto, que o VSB-30 não se encaixa em tal categoria, reforçando a colocação na meta em MRL 9.

Etapa 3 – Definição dos avaliados

Foram feitas duas avaliações da maturidade de fabricação do VSB-30. Uma em uma indústria espacial brasileira que potencialmente pode assumir a fabricação do veículo, e outra no IAE, atual detentor da tecnologia de fabricação do veículo, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2. Avaliações realizadas para validar modelo MRL adaptado

Etapa 4 – Definição de agenda de avaliação

Foi fechada, portanto, uma agenda de avaliação nas duas organizações de forma a dedicar 2 dias para avaliação de cada organização. A agenda foi estabelecida da seguinte forma, junto aos avaliados: revisão da agenda de avaliação, apresentação do responsável pela avaliação e avaliados, descrição dos objetivos e expectativas, visitas a áreas chave do chão de fábrica, discussões individuais ou em grupos entre o avaliador e os especialistas no assunto, encerramento da avaliação com toda equipe envolvida.

Etapa 5 – Condução da avaliação.

A coleta de dados se deu em agosto de 2017 e os resultados da pesquisa refletem a realidade do caso nesse período.

A aplicação do questionário seguiu os passos supracitados na proposta metodológica. O questionário foi respondido de forma discreta com “sim” ou “não” para cada pergunta. Inicialmente para o nível 9, referente a meta, e partir daí, para as áreas de conhecimento cujas questões não foram plenamente respondidas com “sim” novas rodadas de perguntas foram realizadas no nível imediatamente inferior, até que todas as áreas de conhecimento tenham sido respondidas plenamente com “sim”.

Etapa 6 – Preparação do relatório.

O Relatório da Avaliação contém os resultados da mesma. A aplicação da metodologia demonstra o estado em que o produto se encontra em relação ao seu processo de industrialização. Cabe ao gestor responsável realizar análises mais profundas a respeito dos resultados obtidos.

Resultados

A Figura 3 mostra o resultado da avaliação realizada no Potencial Receptor que alcançou o nível 4 em função do menor valor apurado por área de conhecimento.

Figura 3. Resultado MRL do VSB-30 no Potencial Receptor

Relatório da Avaliação										
Sistema / Subistema / Componente	VSB-30 (integração e montagem)									
Organização	Potencial Receptor									
Equipe avaliada	Diretor Novos Negócios + equipe especializada									
Responsável pela avaliação	Marcílio Andrade									
Data	14 e 15 de agosto de 2017									
MRL META	9									
MRL ALCANÇADO	4									
MRL										
Áreas de Conhecimento	Níveis									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A - Base Industrial e Tecnologia de Fabricação							✓	×	×	
B - Design									✓	
C - Custo e Recursos Financeiros			✓	×	×	×	×	×	×	
D - Materiais							✓	×	×	
E - Capabilidade e Controle do Processo								✓	×	
F - Gestão da Qualidade							✓	×	×	
G - Pessoas							✓	×	×	
H - Instalações								✓	×	
I - Gestão da Fabricação						✓	×	×	×	

Em relação às áreas de conhecimento, apenas “design” alcançou a meta satisfatoriamente. “Capabilidade e controle do processo” e “instalações” receberam o nível 8. “Base industrial e tecnologia de fabricação”, “materiais”, “gestão da qualidade” e “pessoas” receberam o nível 7.

“Gestão da fabricação” recebeu o nível 6. A área de conhecimento “custos e recursos financeiros” recebeu o nível 4. Foi responsável, portanto, em estabelecer o nível de maturidade de fabricação do VSB-30 alcançado pelo Potencial Receptor.

O IAE também recebeu o nível 4 em maturidade de fabricação do VSB-30, conforme a Figura 4. Entretanto, o perfil de avaliação por área de conhecimento apresentou diferenças em relação a avaliação do Potencial Receptor.

Figura 4. Resultado MRL do VSB-30 no IAE

Relatório da Avaliação										
Sistema / Subsistema / Componente	VSB-30 (integração e montagem)									
Organização	IAE									
Equipe avaliada	Eng. Dore + equipe especializada									
Responsável pela avaliação	Marcílio Andrade									
Data	06 e 07 de agosto de 2017									
MRL META	9									
MRL ALCANÇADO	4									
MRL										
Áreas de Conhecimento	Níveis									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A - Base Industrial e Tecnologia de Fabricação						✓	×	×	×	
B - Design										✓
C - Custo e Recursos Financeiros				✓	×	×	×	×	×	
D - Materiais						✓	×	×	×	
E - Capabilidade e Controle do Processo										✓
F - Gestão da Qualidade						✓	×	×	×	
G - Pessoas							✓	×	×	
H - Instalações										✓
I - Gestão da Fabricação							✓	×	×	

As áreas de conhecimento “design”, “capabilidade e controle do processo” e “instalações” alcançaram a meta 9 de MRL. “Pessoas” e “gestão da fabricação” receberam o nível 7. “Base industrial e tecnologia de fabricação”, “materiais” e “gestão da qualidade” recebem o nível 6. Da mesma forma que no Potencial Receptor, “custos e recursos financeiros” recebeu o nível 4, também responsável, em estabelecer o nível de maturidade de fabricação do VSB-30 alcançado pelo IAE.

O fato de tanto o Potencial Receptor como o IAE apresentarem níveis de maturidade de fabricação do VSB-30 abaixo da meta em determinadas áreas de conhecimento indica que riscos foram identificados no processo de industrialização. É possível identificar tais riscos por meio das respostas negativas apuradas em cada nível de MRL. Sugere-se, portanto, que para elevar o nível de maturidade de fabricação do VSB-30 até a meta desejada, os riscos identificados sejam classificados e tratados.

Discussão

A pesquisa surgiu de uma necessidade de se auxiliar o processo de industrialização de produtos espaciais em desenvolvimento de forma a torna-lo mais ágil e menos dispendioso. O modelo de MRL adaptado contribui nesse sentido, de modo a identificar claramente o nível de maturidade fabricação de um novo produto a ser inserido no mercado e possibilitar a identificação dos riscos no seu processo de industrialização. A adaptação teve o intuito de tornar o modelo mais genérico de forma a ser utilizado pela indústria espacial bem como por organizações de outras indústrias com

características similares. Considera-se que a adaptação tornou o modelo mais amigável para o uso de forma a trazer questões relevantes e termos conhecidos da atividade espacial.

Várias empresas da indústria de defesa norte americana já utilizam adaptações do MRL proposto pelo DoD para auxiliar seus processos internos da gestão da inovação (MORGAN, 2008). Entretanto, no Brasil esse assunto ainda é incipiente dado o nível de desconhecimento sobre o assunto encontrado durante a realização da pesquisa.

Durante a execução da pesquisa foi constatado que é desejável que o avaliador seja uma pessoa com bons conhecimentos em fabricação ou que se utilize de especialistas nas áreas de conhecimento para auxílio da avaliação, dado o nível de profundidade das questões em cada área de conhecimento. Tal conhecimento é fundamental para se buscar as evidências corretas das questões levantadas. Especialistas são necessários também para responder ao questionário. Por mais que o ponto focal da avaliação seja uma pessoa com profundos conhecimentos na fabricação do objeto, é necessário o auxílio de especialistas das diversas áreas para garantir a resposta correta para cada questão.

Uma questão recorrente no processo de avaliação do MRL é se o objeto deve ser avaliado no nível de sistema ou se é necessário desdobrar em subsistemas e componentes e realizar a avaliação para cada um deles. Nesse sentido, Olechowski, Eppinger e Joglekar (2015) levantam em seu trabalho duas formas de abordar a avaliação de maturidade tecnológica, as quais se aplicam ao MRL: a estrutura total do produto, que consiste em avaliar todos os elementos inclusive os mínimos em um projeto, o que torna a avaliação extensa e exaustiva uma vez que seria preciso avaliar cada parafuso utilizado em um projeto; e, o elemento crítico tecnológico, que avalia somente os elementos que apresentam maior risco. Embora seja mais prático esse método de avaliação, ele pode deixar falhas uma vez que tecnologias ou componentes não são avaliados e os mesmos podem apresentar problemas futuros. Essa questão não é fechada. A NASA define que uma avaliação completa precisa avaliar todos os itens, por mais exaustivos e impraticáveis que sejam (NASA, 2007). Já o DoD recomenda que se faça a avaliação de maturidade em todos os elementos considerados críticos identificados no projeto e não em todos os elementos que o compõem (ROCHA, 2016). A escolha deve ser feita em função do nível de assertividade que se deseja na avaliação e também da mão-de-obra disponível para realizar a avaliação.

Por fim, observa-se que o uso do MRL para avaliação do nível de maturidade de fabricação complementa a avaliação da maturidade tecnológica dada pela ferramenta TRL (*Technology Readiness Level*) criada pela NASA. O TRL avalia o quão madura está determinada tecnologia e o MRL avalia o quão madura está a indústria em fabricar tal tecnologia regularmente com confiabilidade e dentro dos parâmetros estratégicos organizacionais. No caso, o VSB-30 que tem uma maturidade tecnológica elevada, não apresenta a mesma desenvoltura quando o assunto é maturidade de fabricação.

Conclusão

Alcança-se o objetivo principal por meio da elaboração do modelo MRL adaptado e da aplicação do modelo em um estudo de caso envolvendo a fabricação do veículo espacial VSB-30. A avaliação mostrou o nível de maturidade de fabricação do VSB-30 em duas organizações. A meta de MRL estipulada para ambas foi 9, ou seja, produção inicial demonstrada e prontas para iniciar a produção em regime. Entretanto, o nível de maturidade de fabricação de ambas foi avaliado em 4. A área de conhecimento responsável pela atribuição do nível 4 às duas organizações foi “custos e recursos financeiros”. O fato do nível de maturidade de fabricação do VSB-30 ficar abaixo da meta, mostra que foram identificados riscos no processo de industrialização do veículo que devem ser tratados para se alcançar níveis maiores de maturidade de fabricação e conseqüentemente auxiliar a atingir os objetivos de custo e prazo do programa.

Enfim, entende-se que a avaliação sistemática do MRL durante o desenvolvimento de sistemas contribui para um processo de industrialização mais ágil e menos dispendioso, pois identifica claramente o nível de maturidade fabricação de um novo produto a ser inserido no mercado e possibilita a identificação dos riscos no processo de industrialização de tal produto. A adaptação teve o intuito de tornar o modelo mais adequado ao uso pela indústria espacial bem como por organizações de outras indústrias com características similares.

Referências

ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS AEROESPACIAIS DO BRASIL. **Números da AIAB**. São José dos Campos, SP, 2019. Disponível em: <<http://www.aiab.org.br/numeros-da-aiab.asp>>. Acesso em: 25 de setembro 2019.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **DCA 400-6: ciclo de vida de sistemas e materiais da Aeronáutica**. Brasília, DF: COMAER, 2007.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS ECONÔMICOS. **Panorama do setor aeroespacial brasileiro**. São Bernardo do Campo: Confederação Nacional dos Metalúrgicos, 2011. Disponível em: <www.cnmcut.org.br/conteudo/aeroespacial-1>. Acesso em: 05 maio 2018.

UNITED STATES. Department of Defense. **Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook**. Version 2017. Washington, DC, 2017a.

UNITED STATES. Department of Defense. **Effective use of MRLs in an S&T Environment: white paper**. Washington, DC, [200-?]. Disponível em: <<http://www.dodmrl.com/White%20Paper-%20Effective%20use%20of%20MRLs%20in%20SandT.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2017b.

FERNANDEZ, A. F. **Contextual role of TRLs and MRLs in technology management**. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2010.

INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO. **Projetos Espaço - VSB-30**. São José dos Campos, SP, 2018. Disponível em: <<http://www.iae.cta.br/index.php/espaco/vsb-30>>. Acesso em: 09 maio 2018.

LUZ, M. S.; MINARI, G. M.; SANTOS, I. C. Aglomerações industriais no setor aeroespacial e automobilístico no Vale do Paraíba Paulista: uma comparação de trajetórias de formação. **Journal of Aerospace Technology and Management**. v.2, n.1, 2010.

MORGAN, J. **Manufacturing Readiness Levels (MRLs) and Manufacturing Readiness Assessments (MRAs)**. Wright Patterson AFB, OH: AFRL/RXMT, 2008.

NASA. **NASA Systems Engineering Handbook**. Washington, DC, 2007.

OLECHOWSKI, A.; EPPINGER, S. D.; JOGLEKAR, N. Technology Readiness Levels at 40: a study of state-of-the-art use challenges, and opportunities. In: Portland International Conference on Management of Engineering and Technology Conference, 2015, Portland. **Proceedings...** Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2015.

ROCHA, D. **Uma adaptação da norma NBR ISO 16290:2015 aplicada em projetos do Setor Aeroespacial**. 2016. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais, área de Sistemas Espaciais, Ensaios e Lançamentos) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP.

SANTOS, B. V.; MARSHALL, P. M.; DARUIZ, V. T. Avaliação dos atrasos dos contratos industriais dos Programas CBERS e Amazônia e o Grau de Maturidade Tecnológica (TRL) e de Fabricação (MRL). In: WORKSHOP EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS, 4., 2013, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013.

SATELLITE INDUSTRY ASSOCIATION. **State of the satellite industry report**. Washington, DC, 2017.

STANLEY, G. **Manufacturing Readiness Levels**. Wright Patterson AFB, OH: AFRL/RXMT, 2010.

YASSUDA, I. S. **Artefatos de Categorização de Projetos Espaciais e Seleção de Metodologias de Gestão**. 2013. 122f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e método**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2001.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.