

UMA DISCUSSÃO SOBRE A IMPORTÂNCIA DE PADRONIZAR A QUALIDADE E A QUANTIDADE DE INFORMAÇÕES PARA AS ANÁLISES DE CONFIABILIDADE DE SISTEMAS ESPACIAIS

REIS-ARANHA, P. R.¹, PORTO, R. C. F.², RABELLO, A. P. S. S.³, SOUZA, M. L. O.⁴

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

paularelb@hotmail.com, rocafe@yahoo.com.br, anapaula.rabello@inpe.br,
marcelosouzabr@ig.com.br

Resumo. *Sistemas complexos e/ou altamente integrados como satélites, aviões, controles de tráfego aéreo, automóveis, etc., requerem Análises de Confiabilidade em todo o seu ciclo de vida, principalmente na fase de desenvolvimento, onde os prazos e custos para realizar mudanças são menores. Estas análises podem ser apoiadas pela Predição de Confiabilidade, Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), Redução de Esforços entre outras técnicas, contribuindo com o desenvolvimento do projeto e garantindo a conformidade dos requisitos de Confiabilidade. Mas, casos reais da nossa experiência ao verificar/avaliar a documentação detalhada das análises (relatórios) mostram que elas apresentam informações ou dados errôneos e, muitas vezes, até insuficientes sobre o projeto do sistema, os quais podem causar RISCOS (atrasos das entregas, aumento dos custos e até prejuízos ao desenvolvimento do projeto). Isto se deve principalmente à: 1) falta de conhecimentos ou domínio sobre a área de Confiabilidade pelos engenheiros responsáveis em elaborar as análises; e/ou 2) inexistência de formato requerido para apresentar os resultados das análises. Para evitar tudo isso, deve-se padronizar a qualidade e a quantidade de informações para as Análises de Confiabilidade através da utilização de métodos, técnicas, ferramentas, referências a serem adotadas, bem como recomendações a serem seguidas para elaborar as análises e para verificá-las/avaliá-las. Desta forma, mantém-se maior qualidade das análises, reduzem-se os RISCOS, e garante-se maior confiança em conduzir os projetos. Assim, este artigo discute a importância de padronizar a qualidade e a quantidade de informações para as análises de Confiabilidade de sistemas espaciais. Para isto, ele apresenta: 1) exemplos de problemas reais encontrados, 2) recomendações adotadas e/ou sugeridas para futuras soluções e 3) resultados esperados visando melhorias: a) na qualidade da elaboração das análises de Confiabilidade e de suas verificações/avaliações; b) na redução de tempo e esforço dedicado a elas; e c) no registro da padronização.*

Palavras-chave: Análises de Confiabilidade; Qualidade das Informações; Guia de Confiabilidade, Ciclo de Vida do Sistema.

1. Introdução

Sistemas complexos e/ou altamente integrados requerem a avaliação da Dependabilidade, que considerada pelos menos as métricas: Confiabilidade, Manutenibilidade, Disponibilidade, ao longo do seu ciclo de vida (RABELLO, 2017). Neste artigo é mencionada somente a métrica escalar Confiabilidade, dentre as três que englobam a métrica vetorial Dependabilidade. Rabello (2017) também menciona que, quando impostas a satélites, essas métricas exigem que os riscos (ameaças)

1 BS, Estudante de Mestrado – INPE

2 MS, Estudante de Doutorado - INPE

3 PhD, Engenheira de Dependabilidade – INPE

3 PhD, Professor e Pesquisador Sênior - INPE

sejam identificados com precisão e que sejam avaliados durante as fases iniciais do projeto, para que as metas relacionadas a cronograma, custo e qualidade sejam alcançadas.

Os custos devidos à não qualidade (ou à não conformidade) durante as fases de desenvolvimento de sistemas complexos aumentam com o avanço do ciclo de vida (OLIVEIRA, 2011). Em relação aos custos de desenvolvimento de um sistema complexo (Figura 1), conforme apresentado pela *Defense Acquisition University* (DAU) após extensa análise de projetos do *Department of Defense* (DoD), pode-se observar que (INCOSE, 2011):

- O crescimento do custo comprometido do projeto é muito maior que o custo despendido nas fases iniciais; em outras palavras, quando 20% do custo total do projeto já foram despendidos, mais de 80% do custo total do projeto já estão comprometidos devidos a decisões de projeto;
- O custo para eliminar defeitos é menor nas fases iniciais do projeto.

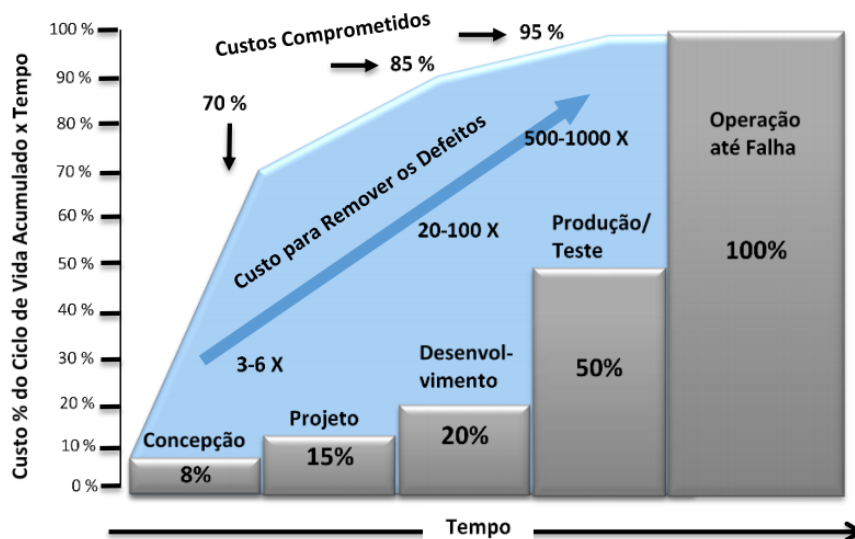


Figura 1. Custos de um projeto durante o ciclo de vida. [Fonte: Rabello (2017), adaptado de INCOSE (2011)].

Considerando os projetos de sistemas espaciais, é habitual a contratação de empresas nacionais para desenvolvimento e fornecimento de subsistemas e equipamentos (itens de um satélite) para tais sistemas. Essa é uma estratégia adotada visando a capacitação gradativa da indústria nacional em tecnologias espaciais, buscando: 1) fomentar a indústria nacional com capacitação e qualificação para desenvolvimento de sistemas espaciais e 2) acompanhar o estado da arte das tecnologias empregadas em sistemas espaciais. Desta forma, fornecedores de itens para os sistemas espaciais entregam análises, como análises de Confiabilidade, sobre o item em questão, ao longo de seu ciclo de vida.

Além dos riscos relacionados aos prazos e custos mencionados acima, e diante das características e objetivos dos projetos de sistemas espaciais, como satélites, os cenários de desenvolvimento devem também considerar riscos que podem se tornar ameaças de diversas naturezas. Alguns exemplos desses riscos são (OLIVEIRA, 2014):

1. Embargos comerciais;
2. Indisponibilidade da infraestrutura física e de recursos humanos especializados na indústria nacional;
3. Desafios relacionados ao desenvolvimento do estado da arte; e
4. Os efeitos físicos do ambiente de fabricação, integração e testes, lançamento e operação.

A fim de mitigar ou mesmo eliminar os riscos, este trabalho visa apresentar uma discussão sobre a Importância de Padronizar a Qualidade e a Quantidade de Informações para as Análises de Confiabilidade de Sistemas Espaciais. Ele se divide em: 1) apresentar os problemas reais encontrados, 2) apresentar as recomendações adotadas e/ou sugeridas para gerar soluções e 3) apresentar os resultados esperados.

Para avaliar a Confiabilidade do sistema são necessárias entregas das análises relacionadas à Confiabilidade dos itens que compõem o sistema (satélites). Para este artigo, que está de acordo com as análises de Confiabilidade previstas atualmente segundo o processo de desenvolvimento no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (estudo de caso), estas análises são basicamente:

- Análise de Predição de Confiabilidade (*Reliability Prediction*);
- Análise de Modos e Efeitos de Falha (*Failure Modes and Effects Analysis - FMEA*);
- Análise de Redução de Esforços (*Derating Analysis*).

Nota: A Análise de Redução de Esforços mencionada neste artigo baseia-se no modelo de Arrhenius (*Temperature acceleration model*) (DODSON, 2002).

Tudo isso justifica a busca pelo estabelecimento de padronizações das informações presentes nas análises de confiabilidade visando: 1) qualidade na elaboração das Análises de Confiabilidade e de suas inspeções/verificações/avaliações; 2) redução de tempo e esforço dedicado a elas; e 3) registro da padronização a fim de evitar que estes itens estejam vinculados somente ao conhecimento tácito dos envolvidos.

Um fator muito importante para a padronização são as normas, guias e documentos técnicos que as instituições utilizam como base para fundamentar todo o processo de desenvolvimento das análises necessárias. Desta forma, as instituições baseiam-se nesses documentos para realizar as análises de Confiabilidade a fim de garantir a qualidade destas. Exemplos relevantes são:

- A Cooperação Europeia para Padronização Espacial (em inglês *European Cooperation for Space Standardization - ECSS*) possui a norma ECSS-Q-ST-30C de Dependabilidade que define o programa de garantia da dependabilidade e os requisitos de dependabilidade para sistemas espaciais. Nesta norma são apresentados os requisitos para realizar as Análises de Confiabilidade. Ela utiliza como base outros documentos como o guia/ *handbook* ECSS-Q-HB-30-08 que é uma diretriz para a seleção de fontes de dados de confiabilidade (ECSS, 2017).
- O Departamento de Defesa Americano (em inglês *Department of Defense - DoD*) possui *handbooks* MIL-HDBK-217, sendo o MIL-HDBK-217F (DOD, 1991), *Notice 1* (DOD, 1992) e *Notice 2* (DOD, 1995) os mais utilizados. Eles são guias para predição de confiabilidade para equipamentos eletrônicos.
- O Comando Espacial da Força Aérea (em inglês *Air Force Space Command*), por meio da norma SMC-S-013, estabelece os requisitos gerais de confiabilidade que envolve projetos espaciais. Esta norma abrange: 1) avaliações de confiabilidade do fornecedor / subcontratado e redundância de componentes internos para engenharia de componentes; 2) avaliações de confiabilidade de itens para engenharia; 3) estudos de confiabilidade quantitativos (previsões de confiabilidade estimadas) e/ou qualitativos entre outros tópicos de grande importância (AFSPC, 2008).
- A norma técnica NASA-STD-8729.1A menciona que a Predição/ Alocação de Confiabilidade, que executa tarefas de previsão, alocação e modelagem para identificar características inerentes à confiabilidade, se faz necessária para sistemas reutilizáveis, ou

onde as taxas de falhas são necessárias para estudos de soluções viáveis dentre as soluções consideradas (*tradeoff studies*), análise de economia, avaliação de risco, etc. (NASA, 2017).

2. Conceitos Gerais

Os conceitos gerais necessários para este trabalho estão listados abaixo, e estão de acordo com ECSS (2012), Longman (1995) e INPE (2017):

“Confiabilidade: é a capacidade de um item realizar uma função requerida sob dadas condições por um determinado intervalo de tempo.

- Nota 1: é assumido, em geral, que o item está em um estado normal para realizar sua função requerida no início do intervalo de tempo.
- Nota 2: geralmente, a performance de confiabilidade é quantificada usando medidas apropriadas. Em algumas aplicações, estas medidas incluem uma expressão da performance de confiabilidade como uma probabilidade, que também é denominada Confiabilidade.” (ECSS, 2012).

“Manutenabilidade: é uma métrica que reflete a probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva para um item, sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos” (ECSS, 2017).

“Disponibilidade: é a probabilidade de que o item esteja funcionando corretamente quando for solicitado (RELIASOFT, 2018).”

“Dependabilidade: é a extensão na qual o cumprimento de uma função exigida pode ser justificadamente confiável, seus principais componentes são Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenabilidade (ECSS, 2012).”

“Análise: um método de verificação utilizando técnicas e ferramentas para confirmar que os requisitos estão sendo cumpridos (exemplos de técnicas e ferramentas são modelos matemáticos, compilação de avaliações de similaridade e validação de registros)” (ECSS, 2012).

“Avaliação (em inglês: *Assessment*): um julgamento que se faz sobre uma pessoa ou situação depois de considerar todas as informações.” (LONGMAN, 1995). Para este trabalho, isto se refere à avaliação das análises de Confiabilidade.

“Avaliação (em inglês: *Evaluation*): um julgamento sobre como algo é bom, útil ou eficaz.” (LONGMAN, 1995). Para este trabalho, isto se refere a reavaliar o valor de Confiabilidade de um item.

“Análise de Predição de Confiabilidade: é a predição da probabilidade de sucesso da parte sob análise em determinadas condições e tempo especificados” (ECSS, 2012).

“FMEA: é a análise realizada com a finalidade de identificar os modos de falhas de um item (produto/ função/ processo) e classificar seus efeitos, sendo que a classificação dos efeitos de falhas é dada através da categoria Severidade (abordagem qualitativa)” (INPE, 2017).

“Análise de Redução de Esforços (*Derating Analysis*): consiste em analisar as condições de utilização de parâmetros elétricos, térmicos ou qualquer natureza de esforços para componentes eletro/eletrônicos segundo determinados limites estabelecidos por referências (em geral normas, manuais) que permitam a não degradação antecipada na utilização destes componentes” (INPE, 2017).

O conceito de hierarquia de sistemas considerado neste trabalho está representado na Figura 2 abaixo.



Figura 2. Hierarquia de sistemas.

Neste trabalho:

- O sistema é o satélite;
- O sistema é composto por itens, ou seja, o nível de item é um ou mais níveis inferiores ao nível do sistema satélite, podendo o item ser um subsistema ou um equipamento;
- O item é composto por partes, ou seja, o nível da parte é um nível inferior ao nível do item, podendo a parte ser:
 - um equipamento, se o item for um subsistema;
 - um componente, se o item for um equipamento.

Um conceito de grande relevância para este trabalho é o de fase do ciclo de vida do produto que, segundo Loureiro (1999), é “um conjunto de atividades que caracteriza os estágios da evolução do produto. A evolução do produto inicia pela percepção dos requisitos de *stakeholder* e termina com o descarte do produto”.

A Figura 3 mostra um exemplo de fases do ciclo de vida de projetos espaciais, um modelo parcialmente adotado da ECSS, pois existem adaptações devidas a particularidades das instituições.

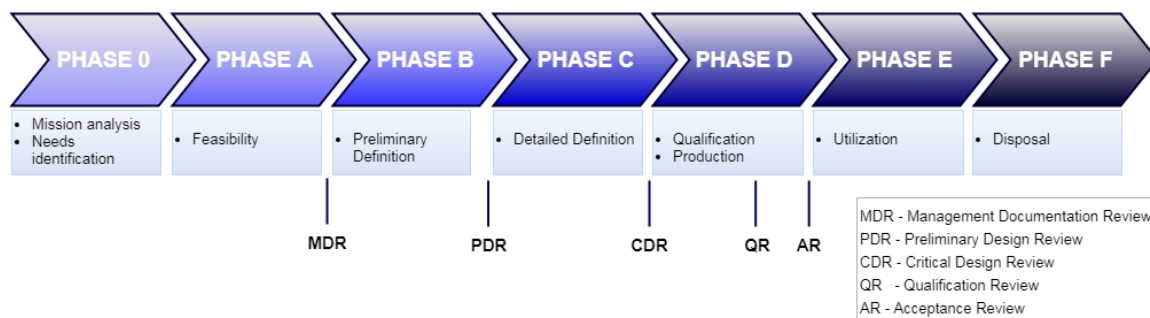


Figura 3. Ciclo de vida de um projeto espacial do INPE.

O exemplo apresentado na Figura 3 é o modelo do ciclo de vida de produtos espaciais adotado pelo INPE (estudo de caso) e, este se baseia no padrão ECSS (2009), e é dividido em 7 fases que são:

- Fase 0 – Análise de Missão; Identificação das necessidades
- Fase A – Viabilidade
- Fase B – Projeto Preliminar
- Fase C – Projeto Detalhado

- Fase D – Qualificação; Produção
- Fase E – Operação
- Fase F – Descarte

Os objetivos por fases apresentados pela ECSS (2009) são:

- As Fases 0, A e B focam principalmente na:
 - Elaboração funcional do sistema e dos requisitos técnicos, e identificação dos conceitos do sistema para cumprir com a declaração da missão;
 - Identificação das atividades e recursos necessários para o desenvolvimento do projeto;
 - Avaliação inicial dos riscos técnicos e programáticos; o Início das atividades de pré-desenvolvimento.
- Fases C e D:
 - Incluem todas as atividades de desenvolvimento e qualificação do produto.
- Fase E:
 - Incluem todas as atividades de lançamento, comissionamento, operação e manutenção do produto.
- Fase F:
 - Incluem todas as atividades de descarte.

Como apresentado em ECSS (2017), as Análises da Dependabilidade, que englobam a métrica Confiabilidade, devem ser realizadas em todos os projetos espaciais ao longo do ciclo de vida, tendo como objetivos:

- Apoiar o desenvolvimento do projeto nas fases conceitual, preliminar e detalhada (correspondente às Fases 0, A e B do padrão ECSS);
- Apoiar a definição dos requisitos;
- Garantir a conformidade dos requisitos de: Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenabilidade.

3. Discussão e Resultados Esperados

Para discutir sobre a importância de padronizar a qualidade e a quantidade de informações para as Análises de Confiabilidade de sistemas espaciais, adotou-se como estudo de caso a experiência do INPE na condução de projetos de satélites como verificador/avaliador da documentação detalhada de análises de Confiabilidade (relatórios). Assim, este tópico será dividido em três fases que são:

- 1ª Fase: Apresentação do problema; o que aconteceu até agora ao verificar/avaliar a documentação detalhada das análises (relatórios) de Confiabilidade;
- 2ª Fase: Solução/mitigação do problema; que representa onde estamos hoje, para evitar o problema;
- 3ª Fase: Resultados esperados da solução/mitigação do problema; que representa o futuro próximo com a aplicação/colocação da 2ª Fase em prática.

Nota: O foco destas fases é discutir e apresentar os resultados esperados em torno do estudo de caso, ou seja, limitado aos projetos de satélites do INPE. Porém, isso pode ser adaptado/refletido

para o desenvolvimento de outros sistemas complexos e/ou altamente integrados diferentes do adotado como estudo de caso.

1ª Fase: apresentação do problema

Os fornecedores de itens que compõem o sistema satélite do INPE entregam análises de Confiabilidade (Predição de Confiabilidade, Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA) e Análise de Redução de Esforços (*Derating Analysis*)) referentes ao item em questão, durante todo seu ciclo de vida. E ao avaliá-las, frequentemente observa-se que as informações ou os dados das análises apresentam-se em duas situações: 1) informações/ dados com erros e/ou 2) informações/dados insuficientes sobre o projeto do sistema.

Situação 1: Informações/ dados com erros sobre o projeto do sistema

Um dos problemas identificados com frequência ao avaliar a documentação das Análises de Confiabilidade é encontrar informações com erros sobre os itens do sistema. Na Tabela 1 são apresentados alguns destes erros identificados em análises (casos reais).

Tabela 1. Alguns dos principais erros encontrados nas Análises de Confiabilidade.

Erros comuns	Como apresentado nas análises	Como esperado (desejado)
Erro em não considerar como referência as versões mais atuais ou não referenciar adequadamente na documentação.	Apenas a norma MIL-HDBK-217 F	MIL-HDBK-217 F, NOTICE 1e NOTICE 2
	Nenhuma (não citou referências)	MIL-HDBK-217 F, NOTICE 1e NOTICE 2
Erro em cálculos da taxa de falhas (λ)	$\lambda_{Total} = \sum \lambda_{EEE\ parts}$	$\lambda_{Total} = \sum \lambda_{partes\ EEE\ parts} + \lambda_{taxa\ de\ falhas\ de\ conexões\ e\ de\ conectores} + \lambda_{taxa\ de\ falhas\ de\ placas\ PCB}$
Simplificação de cálculos de confiabilidade	Configuração Série do DBC (Diagrama de Blocos de Confiabilidade)	Configuração combinada entre Série e paralelo de DBC
Uso de versões obsoletas de outras análises relacionadas (ex.: análise térmica), normas, etc.	Análise Térmica do Subsistema X versão V1	Análise Térmica do Subsistema X versão V3
Informações incompatíveis das análises (entre as três análises), como nomenclaturas diferentes para um mesmo parâmetro ou vice-versa	Para a Análise de Predição de Confiabilidade, R_A representa o valor da confiabilidade do subsistema X. E para FMEA, R_1 representa o valor da confiabilidade do mesmo subsistema X	Para todas as três análises de confiabilidade, R_A representa o valor da confiabilidade do subsistema X

Isto se deve a muitos fatores, mas principalmente à inexistência de formato requerido para apresentar os resultados das análises de Confiabilidade entregues.

Os erros apresentados na Tabela 1 podem comprometer seriamente a análise e afetar o valor da confiabilidade do produto. Como exemplo, têm-se os erros de referência (ver linha 1 da Tabela 1), pois existem alterações significativas entre as atualizações F, F Notice1 (FN1) e F Notice 2 (FN2) da MIL HDBK 217. Mais detalhes de quanto isto pode afetar o valor de confiabilidade podem ser encontrados em Porto (2014), que apresenta um estudo que detalha as alterações entre as atualizações do manual MIL HDBK 217. Porto (2014) mostra os componentes que foram mais afetados pelas mudanças do manual; e, para alguns componentes (os mais críticos), quantifica a alteração na taxa de falhas.

Estes são fatores que evidenciam a necessidade de discutir a importância de padronizar a **qualidade** das informações a serem apresentadas nas Análises de Confiabilidade de Sistemas Espaciais.

Situação 2: Informações/dados insuficientes sobre o projeto do sistema

Outra situação frequente ao avaliar a documentação das Análises de Confiabilidade é a insuficiência de informações sobre o item em análise do sistema.

Um exemplo desta situação é o fornecedor de um dado item do sistema deixar de/ não apresentar na Análise de Predição da Confiabilidade o valor da taxa de falhas de uma parte deste item cujo valor de taxa de falhas é um valor relevante para a análise.

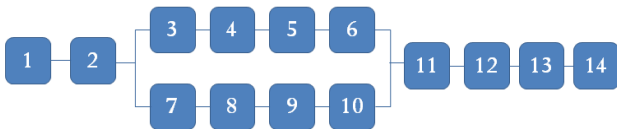
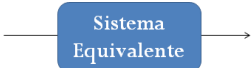
Uma causa desta situação é o fornecedor não possuir informações detalhadas das partes deste item nas análises. Ou seja, é muito comum haver partes deste item que possuem como informação apenas o valor da confiabilidade e o tempo de missão. Isto gera consequências (efeitos) indesejáveis ao determinar o valor de Confiabilidade do sistema, como amplificação de erros.

Um efeito desta situação é a dificuldade ou a inviabilidade de reavaliar o valor da confiabilidade de um item. Para ilustrar este efeito, tem-se que, em dadas circunstâncias reais, é possível que um item projetado para um sistema possa ser integrado em outro sistema semelhante ao original. E, apesar da similaridade destes sistemas em muitos aspectos, cada um pode possuir suas particularidades, e algumas destas estão diretamente relacionadas ao valor da confiabilidade, como por exemplo, o tempo de missão. Desta forma, é necessário a padronização das particularidades, sendo indispensável à reavaliação (recálculo) do valor da confiabilidade para viabilizar a integração do item ao novo sistema.

A Tabela 2, fundamentada no estudo feito por Porto e Reis-Aranha (2016), caracteriza um cenário em duas abordagens em que: A) se conhece o detalhamento do item do sistema: o Diagrama de Blocos de Confiabilidade (DBC) que mostra a configuração, pelo ponto de vista de Confiabilidade, dos subitens do item, ou seja, de um nível hierárquico inferior ao item e B) não se conhece o detalhamento do item do sistema, ou seja, por falta de informações o item é tratado como uma caixa preta. A Tabela 2 apresenta a função confiabilidade do sistema (abordagem A) e a função aproximada (abordagem B) devido à falta de informações. E, levando em consideração o exposto acima, quando houver a necessidade de reavaliar o valor de Confiabilidade (por exemplo, quando um item projetado para um sistema vai ser integrado em outro sistema semelhante ao original), esta reavaliação é realizada por meio da extrapolação dos tempos de missão; e, quando não há o detalhamento do item (abordagem B) com informações precisas para a reavaliação, esta se dá por meio de aproximações. Isto acarreta em erros que podem ser maiores devido à insuficiência ou indisponibilidade de informações/dados do item a ser reavaliado. Ou seja, a insuficiência de informações pode colaborar de forma expressiva no erro gerado na avaliação a ponto de não ser recomendável realizá-la.

O cenário em duas abordagens apresentado na Tabela 2 exemplifica como a indisponibilidade de informações necessárias pode comprometer a confiabilidade de um item; e que análises mais robustas e completas, possibilitam e colaboram na solução de futuros problemas, de tal forma que as informações contidas nas análises de confiabilidade permitam a reavaliação do valor de confiabilidade com melhor acurácia e precisão.

Tabela 2. Tabela de equivalências para as abordagens A e B. [Fonte: Porto e Reis-Aranha (2016)]

	Abordagem A	Abordagem B
Diagrama de Blocos		
Função Confiabilidade	$R = R_1 x R_2 x \{1 - [1 - (R_3 x R_4 x R_5 x R_6)] x [1 - (R_7 x R_8 x R_9 x R_{10})]\} x R_{11} x R_{12} x R_{13} x R_{14} \quad (1)$	$R = Req \quad (2)$
	$R = -e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})} + e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})} + e^{-t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})} \quad (3)$	$R = e^{-\lambda_{eq} t} \quad (4)$

Nota: Na abordagem A, a Função Confiabilidade foi obtida por meio de seu DBC, considerando que o comportamento da curva de falhas **das partes do item** siga a lei exponencial, segundo Meyer (1969). E na abordagem B, considera-se que o comportamento da curva de falhas **do item** siga a lei exponencial.

Estes são fatores que evidenciam a necessidade de discutir a importância de padronizar a **quantidade** das informações a serem apresentadas nas Análises de Confiabilidade de Sistemas Espaciais.

Portanto, informações/ dados com erros (Situação 1) e/ou insuficientes (Situação 2) nas análises de Confiabilidade podem prejudicar o desenvolvimento do projeto, provocar atrasos e aumento de custos. Os atrasos são principalmente devidos aos retrabalhos provocados pela reelaboração das análises que, em muitos casos, ocorrem mais de uma vez. Cada atraso resulta de um tempo maior dedicado ao retrabalho, o que representa custo de homens/hora tanto para a realização das análises (no estudo de caso: feitas pelos fornecedores de itens para os sistemas do INPE) em reelaborar as análises, quanto para a avaliação (no estudo de caso: feita pelo INPE), que reavalia cada versão das mesmas análises.

2ª Fase: Recomendações para gerar soluções/mitigação do problema

A fim de evitar os problemas apresentados na fase anterior, é necessário que haja padronização quanto à qualidade e a quantidade de informações desejadas e necessárias nas Análises de Confiabilidade.

Situação 1: Recomendações para a padronização quanto à qualidade de informações desejadas e necessárias nas Análises de Confiabilidade sobre o projeto do sistema (para gerar soluções/mitigação de informações/ dados com erros)

Tem-se como solução/mitigação do primeiro problema (análises apresentarem informações com erros) a criação/padronização de requisitos para utilização de técnicas, métodos, ferramentas e referências, a serem adotadas para elaborar as análises, bem como para avaliá-las. Assim, a

confeção/existência de um guia/*handbook* de elaboração das análises que forneça orientações para a preparação da Análise de Predição de Confiabilidade, Análise de Redução de Esforços (*Derating Analysis*) e FMEA é de extrema importância para as atividades do desenvolvimento de programas/projetos de sistemas complexos e/ou altamente integrados.

Atualmente, há dois guias elaborados no INPE com a finalidade de mitigar os problemas apresentados na 1ª Fase. Os guias são:

1. Guia de Elaboração das Análises de Confiabilidade (Predição de Confiabilidade, Redução de Esforços (*Derating*) e FMEA/FMECA) para partes Elétricas, Eletrônicas e Eletromecânicas (EEE) para os satélites do INPE (Guia 1) e;
2. Guia de Avaliação das Análises de Confiabilidade (Predição de Confiabilidade, Redução de Esforços (*Derating*) e FMEA/FMECA) para Partes Elétricas, Eletrônicas e Eletromecânicas (EEE) de Satélites do INPE (Guia 2).

Nota 1: O guia de elaboração das análises (Guia 1) foi verificado e aprovado, e já se encontra publicado internamente no INPE para aplicá-lo em projetos de satélites.

Nota 2: O guia de avaliação das análises (Guia 2) já foi elaborado, mas ainda não foi verificado e aprovado.

O Guia 1 fornece orientações para os fornecedores do INPE com relação à preparação das três análises de Confiabilidade para partes elétricas, eletrônicas e eletromecânicas (EEE), como parte integrante das atividades do desenvolvimento de projetos de satélites do INPE. Este guia ainda apresenta a definição dos conceitos, requisitos e estratégia de desenvolvimento para a elaboração das três análises, e, posteriormente, apresenta individualmente os diferentes tipos de análises, conceitos específicos e as orientações para seu desenvolvimento em atendimento aos requisitos. De um modo geral, priorizou-se neste guia (Guia 1) um suporte teórico com relação aos parâmetros envolvidos em cada análise. Há também no fim do documento, em anexos, modelos de conteúdo e de planilhas para cada análise, que representam o conteúdo mínimo de informações que o INPE precisa para a avaliação do projeto (sob a ótica da Confiabilidade), garantindo maior qualidade da documentação (REIS-ARANHA, 2016).

Alguns dos principais tópicos presentes no Guia 1 são: Documentos de Referência e Definição de Termos para as Análises; e, para cada uma das três análises (Predição de Confiabilidade, Redução de Esforços (*Derating Analysis*) e FMEA):

- Métodos para a Elaboração da Análise;
- Requisitos;
- Modelo de Planilhas para apresentação e detalhamento dos valores apresentados nas Análises;
- Conteúdo mínimo do Documento de Análise.

O Guia 2 fornece orientações para a equipe de Dependabilidade do INPE com relação à avaliação das três análises de Confiabilidade para partes elétricas, eletrônicas e eletromecânicas (EEE), como parte integrante das atividades do desenvolvimento de projetos de satélites do INPE. Para isso, primeiramente, é definido neste guia o conceito de Confiabilidade e seus tipos de análises. Posteriormente, é apresentada uma metodologia de avaliação que o INPE deve utilizar para avaliar os documentos das análises elaboradas pelos fornecedores. O INPE deve garantir, através das avaliações, a conformidade/ concordância destas análises com o projeto do sistema; e estas devem ser cumpridas para resultar no sucesso do projeto. Assim, neste guia (Guia 2) priorizou-se a criação de uma metodologia de avaliação, sendo esta dividida em: 1) avaliação geral, em que os tópicos de avaliação são comuns a todas as análises e 2) avaliação específica, onde os tópicos de avaliação são característicos de cada análise. Há também no fim do documento, em anexo, checklists de

avaliação para cada análise, que facilitará a equipe do INPE avaliar de uma forma mais completa os documentos de análises (REIS-ARANHA, 2016).

Alguns dos principais tópicos presentes no Guia 2 são: Documentos de Referência e Definição de Termos para as Análises; e, para cada uma das três análises (Predição de Confiabilidade, Redução de Esforços (*Derating Analysis*) e FMEA):

- Métodos para a Avaliação da Análise;
- Checklist para Avaliação da Análise.

A Tabela 3 mostra um breve paralelo entre o Guia 1 e o Guia 2 a partir dos critérios: objetivo, público alvo e situações/ status (passado, presente e futuro) de cada guia.

Tabela 3. Um breve paralelo entre o Guia 1 e o Guia 2.

Crítérios	Guia 1	Guia 2
Objetivo	• Mostrar o COMO devem ser <u>elaboradas</u> as Análises de Confiabilidade.	• Mostrar o COMO devem ser <u>verificadas/ avaliadas</u> as Análises de Confiabilidade.
Público alvo	• Elaboradores das Análises de Confiabilidade (Fornecedores do INPE).	• Avaliadores das Análises de Confiabilidade (INPE).
Situação passada (Etapa realizada)	• Identificação dos problemas nas análises; • Levantamento das necessidades em normalizar as elaborações das análises; • Elaboração da primeira versão; • Verificação da versão.	• Identificação das dificuldades na avaliação e reavaliação das análises; • Levantamento das necessidades em normalizar as avaliações das análises, a fim de realizá-las de forma mais completa e rápida.
Situação atual (Etapa atual)	• Já publicado internamente (Base de documentos pertencentes ao INPE/CGETE (CDOC)); • Ainda não foi aplicado a nenhum projeto novo ou em andamento.	• Elaboração da primeira versão; • Em revisão.
Situação futura (Próxima etapa)	• Tornar requisito a sua utilização, endereçada à Engenharia da Dependabilidade; • Aplicação aos projetos de satélites do INPE; • Levantamento, comparação e análise dos resultados, benefícios e melhorias da pós-utilização do Guia 1 <i>versus</i> sua pré-utilização.	• Verificação; • Publicação interna no INPE; • Tornar requisito a sua utilização, endereçada à Garantia da Dependabilidade, • Aplicação aos projetos de satélites do INPE; • Levantamento, comparação e análise dos resultados, benefícios e melhorias da pós-utilização do Guia 2 <i>versus</i> sua pré-utilização.

Então, para que ambos os guias sejam utilizados nos projetos, os seguintes passos serão necessários:

1. Aprovação dos Guias pelos responsáveis das equipes de Garantia do Produto, Engenharia e Gerenciamento de Sistemas;
2. Esclarecimentos às equipes envolvidas nos projetos através de reuniões técnicas internas;
3. Solicitação aos fornecedores de partes do sistema satélite que cumpram com os requisitos do Guia 1;

4. Esclarecimentos, quando necessário, às equipes de fornecedores envolvidas nos projetos através de reuniões técnicas sobre o Guia 1;
5. Solicitação às equipes internas de avaliadores que cumpram com os requisitos do Guia 2.

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre o como é hoje (sem a aplicação dos Guias) e o como será com a aplicação dos Guias. Esta figura busca mostrar o ganho que terá os fornecedores (elaborados das análises) e o INPE (avaliadores das análises).

Tabela 4. Comparativo entre o hoje (sem a aplicação dos Guias) e o futuro breve (com a aplicação dos Guias).

	COMO É HOJE (sem a aplicação dos Guias)	COMO SERÁ (com a aplicação dos Guias)
Fornecedores (elaboradores das análises)	<ul style="list-style-type: none"> Documentos de requisitos do projeto; Conhecimento tácito dos envolvidos nas análises de Confiabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Documentos de requisitos do projeto; Guia 1 (para Elaboração das análises de Confiabilidade).
INPE (avaliadores das análises)		<ul style="list-style-type: none"> Documentos de requisitos do projeto; Guia 1 (para Elaboração das análises de Confiabilidade) Guia 2 (para Avaliação das análises de Confiabilidade).

Situação 2: Recomendações para a padronização quanto à quantidade de informações desejadas e necessárias nas Análises de Confiabilidade sobre o projeto do sistema (para gerar soluções/mitigação de informações/ dados insuficientes)

Porto e Reis-Aranha (2016) apresentam medidas que podem ser tomadas para mitigar o segundo problema (análises com insuficiência de informações) e viabilizar a reavaliação da confiabilidade: **a disponibilidade de detalhamento do DBC e dos valores de taxas de falhas**. Tal detalhamento se refere ao menos, para o próximo nível inferior ao nível do item sob análise, garantindo assim um valor de confiabilidade mais próximo do valor ideal. No entanto, nem sempre isso é possível; e, desta forma, algumas medidas sugeridas auxiliam a obtenção de mais dados e uma melhor estimativa. Para isto, devem-se solicitar **valores de confiabilidade em mais de um tempo de missão**, possibilitando a reavaliação da confiabilidade em tempos diferentes daquele fornecido, a fim de alcançar um valor confiável com o menor erro possível. Sugere-se solicitar ao menos os valores de confiabilidade para duas unidades de tempo acima e abaixo do tempo de missão. Importante considerar as observações em relação a extrapolações feitas por Porto e Reis-Aranha (2016):

- A reavaliação da Confiabilidade por meio da extrapolação para tempos inferiores aos de referência possui sempre o menor erro, comparando-se com tempos superiores aos de referência. Ou seja, possuem erros absolutos menores e aproximam a confiabilidade para um valor abaixo do valor nominal. Por exemplo, é necessária a confiabilidade de um item para integração em um sistema com vida útil de 5 anos. Mas, as informações existentes do item são apenas a confiabilidade para 7 e 3 anos, desconhecendo-se o DBC e as taxas de falhas de seus elementos. Desta forma, é necessária a reavaliação e é sugerido extrapolar a Função Confiabilidade de 7 para 5 anos, ao invés de 3 para 5 anos, pois se obterá em módulo o menor erro absoluto (PORTO, REIS-ARANHA, 2016).
- Quanto maior for o intervalo de tempo a ser empregado na extrapolação acima do tempo de referência, maior será o erro. Por exemplo, o erro em extrapolar a Função Confiabilidade de 7 para 5 anos é maior que extrapolar de 6 para 5 anos.

As soluções adotadas e sugeridas buscam a qualidade na realização das análises de Confiabilidade através da padronização da qualidade e da quantidade mínima de informações existentes para estas análises.

3ª Fase: resultados esperados com a solução/mitigação do problema

Nesta fase, que representa um futuro próximo, espera-se que haja melhoria nos seguintes pontos:

1. Qualidade na elaboração das análises de confiabilidade e suas inspeções/verificações/avaliações:
 - Com a utilização dos Guias haverá melhoria na qualidade da elaboração das análises e suas respectivas avaliações. O papel do elaborador é seguir o que é apresentado no Guia 1, enquanto que o papel do avaliador é fazer uma comparação entre o Guia 1 e a análise realizada. Com os dois Guias, o avaliador realizará uma avaliação mais completa das análises, garantindo que ele não perca nenhum ponto importante a ser verificado/avaliado na análise.
2. Redução do tempo e esforço dedicados às Análises:
 - Com os dois guias, tanto o elaborador quanto o avaliador das análises evitarão retrabalhos, se seguirem o que é apresentado nos guias, além de garantir uma melhor qualidade de elaboração e avaliação das análises.
3. Registro de padronização e requisitos:
 - Todas as recomendações e procedimentos passam a ser registradas. Isso evita que informações estejam vinculadas apenas ao conhecimento tácito dos envolvidos e se percam ao longo do tempo.
4. Possibilitar, quando solicitado ou necessário, a reavaliação da confiabilidade de itens que compõem um sistema:
 - Caso seja necessário reavaliar a confiabilidade, devido à mudança de algum parâmetro relacionado a esta, esta reavaliação será feita da melhor forma possível, dado que informações necessárias para a reanálise sobre o item estarão disponíveis. Esta é uma situação que já ocorreu e ainda pode ocorrer durante o desenvolvimento de satélites no INPE, devido à semelhança de alguns projetos existentes.

A padronização visa melhorar a qualidade das análises quanto à **qualidade** e a **quantidade** de informações necessárias para as análises de confiabilidade do sistema. Desta forma, as análises se tornarão mais robustas, objetivas e completas, minimizando custo e tempo com retrabalhos e possibilitando reavaliações quando necessário.

4. Conclusão

Este artigo mostra um problema recorrente em projetos de sistemas espaciais representado em duas situações em que as informações ou os dados das análises de Confiabilidade apresentam-se: 1) com erros e/ou 2) insuficientes sobre o projeto do sistema. Também mostra o como evitar/minimizar o problema a partir de soluções simplificadas que são: 1) a geração de guias/*handbooks* para elaborar e verificar/avaliar as análises, no caso da situação 1, e também, no caso da situação 2, 2) a disponibilidade de detalhamento do DBC e dos valores de taxas de falhas ao menos do próximo nível inferior ao nível do item sob análise, e quando isto não é possível, é realizada solicitação de, ao menos, alguns valores de confiabilidade do item em mais de um tempo de missão. No momento em que estas soluções sugeridas forem colocadas em prática, espera-se que haja ganhos significativos: 1) na **qualidade** na elaboração das análises de Confiabilidade e de suas

verificações/avaliações, 2) na **redução de retrabalho** das análises, que custam tempo e dinheiro às organizações/instituições, 3) no **registro da padronização e de requisitos** a fim de evitar que estes estejam vinculados somente ao conhecimento tácito dos envolvidos, e 4) na possibilidade, quando solicitado ou necessário, de **reavaliação da confiabilidade** de itens de um sistema. Tudo isso busca melhorar os aspectos de tempo, custo e qualidade de projetos que, consequentemente, **reduzem os riscos** (de atrasos das entregas, aumento dos custos e até prejuízos ao desenvolvimento do projeto) e trazem benefícios às organizações/ instituições na condução de projetos de sistemas complexos e/ou altamente integrados, como sistemas espaciais.

***Agradecimentos:** As autoras agradecem à CAPES/CNPQ pela concessão de suas bolsas de Mestrado e de Doutorado. Todos os autores agradecem ao INPE, sua Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espaciais, seu Curso– ETE/CSE, e seu Serviço de Engenharia da Qualidade – SEQ pelo suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.*

Referências

- Air Force Space Command - AFSPC. SMC-S-013 - **Space and Missile Systems Center Standard Reliability Program For Space Systems**. 2008. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a633330.pdf>
- Defense Acquisition University - DAU. **Committed Life Cycle Cost against Time**. 3.1. Fort Belvoir, VA. 1993.
- Department of Defense - DoD. MIL-HDBK-217F - **Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment**. Washington DC, 1991. 205p.
- Department of Defense - DoD. MIL-HDBK-217F (Notice 1) - **Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment**. Washington DC, 1992. 37p.
- Department of Defense - DoD. MIL-HDBK-217F (Notice 2) - **Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment**. Washington DC, 1995. 80p.
- Dodson, B.; Nolan, D. **Reliability engineering handbook**. Chapter: Derating Principles. Tucson, AZ, 2002.
- European Cooperation for Space Standardization - ECSS. ECSS-M-ST-10C Rev. 1: **Project planning and implementation**. Noordwijk, The Netherlands: ECSS, 6 March 2009. 50 p.
- European Cooperation for Space Standardization - ECSS. ECSS-Q-HB-30-08A. **Components reliability data sources and their use**. Noordwijk, The Netherlands: ECSS, 14 January 2011. 31 p.
- European Cooperation for Space Standardization - ECSS. ECSS-Q-ST-30C Rev. 1: **Dependability**. Noordwijk, The Netherlands: ECSS, 15 February 2017. 65 p.
- European Cooperation for Space Standardization - ECSS. ECSS. ECSS-ST-00-01: **ECSS System – glossary of terms**. Noordwijk, The Netherlands, 1 October 2012. 63 p.
- International Council on Systems Engineering - INCOSE. **Systems Engineering Handbook v.3.2.2 – A guide for system life cycle processes and activities**. San Diego, CA, 2011. 386p.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. SESEQ-Q-HBK-00047. **Guia de elaboração das análises de confiabilidade** (predição de confiabilidade, redução de esforços (*Derating*)) e FMEA/FMECA de partes elétricas, eletrônicas e eletromecânicas para os satélites do INPE. São José dos Campos-SP, Brasil. 20 de dezembro de 2017. 85 p.
- Longman. **Dictionary of contemporary English**. 3rd. ed. Harlow, UK: Pearson Education, 1995. 1668 p.

- Loureiro, G. **A Systems Engineering and Concurrent Engineering Framework for the Integrated Development of Complex Products**. Tese (Ph.D.) – Loughborough University. 1999.
- Meyer, P. L. **Probabilidade - aplicações à estatística**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1969. 391 p.
- National Aeronautics and Space Administration - NASA. NASA-STD-8729.1A - **NASA Reliability and Maintainability (R&M) Standard for Spaceflight and Support Systems**. 2017. 52 p.
- Oliveira, M. E. R. A. **Política de compras do Programa Espacial Brasileiro como instrumento de capacitação industrial**. 2014. 348 p. (sid.inpe.br/mtcm19/2014/02.03.19.36-TDI). Tese (Doutorado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.
- Oliveira, J. C. **Método de avaliação de custos da não qualidade em projetos espaciais - caso do programa CBERS**. 2011. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3AD3278>.
- Porto, R. C. F. **Análise e comparação dos manuais da família MIL-HDBK-217F e proposta de melhoria de processos de confiabilidade de equipamentos eletrônicos espaciais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais). 2014. 439p.
- Porto, R. C. F.; Reis-Aranha, P. R. **Avaliação da Confiabilidade de Sistemas Espaciais para Diferentes Tempos de Missão**. Artigo publicado no 7º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 2016. 8 p.
- Rabello, A. P. S. S.; Souza, M. L.O. **A discussion on the interaction between project management and systems engineering to improve the dependability of space and automotive projects**. In: Congresso e exposição internacionais de tecnologia da mobilidade (SAE), São Paulo, Brasil. 2017.
- Rabello, A. P. S. S. **Relatório técnico**. Programa de Capacitação Institucional – PCI/ MCT/ INPE. 2009. 39p.
- Rabello, A. P. S. S. **Um novo processo para melhorar a Dependabilidade de sistemas espaciais entre as fases de planejamento e projeto detalhado incluindo extensões do Diagrama de Markov (DMEP) e da FMECA (FMEP) a projetos**. Tese de Doutorado do Curso CSE/ETE do INPE. 2017. 344 p.
- Reis-Aranha, P. R. **Melhoria da avaliação dos resultados das análises de confiabilidade e FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) da plataforma multimissão**. Relatório técnico do projeto de bolsa PCI/CNPq/MCTI/INPE. 31 de dezembro de 2016. 37 p.
- ReliaSoft Reliability engineering and textbook library – **System Analysis (RBDs or Fault Trees)**. Disponível em: http://www.reliawiki.org/index.php/Introduction_to_Repairable_Systems. Visitado em: 30/10/2019, às 11h33.