



## Aprimoramento de um método de predição da confiabilidade de equipamentos eletrônicos militares e espaciais

SANTOS, C. E. S.<sup>1</sup>, RABELLO, A. P. S. S.<sup>2</sup>, SOUZA, M. L. O.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Carlos Eduardo da Silva Santos, Aluno de Mestrado do Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais, Opção Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Ana Paula de Sá Santos Rabello, Doutora, do Grupo de Dependabilidade/SESEQ. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, Doutor, Pesquisador Titular, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

cadu2000@gmail.com

---

**Resumo.** *A predição da confiabilidade de equipamentos eletrônicos espaciais e militares está se tornando cada vez mais complexa, uma vez que os sistemas estão se tornando cada vez mais complexos e/ou altamente integrados. Apesar da disponibilidade de diferentes métodos de predição da confiabilidade, os resultados não se mostram aceitáveis para a necessidade atual (métodos mais antigos). Outros métodos mais recentes permitem uma predição da confiabilidade mais precisa e realista. Estes são baseados na análise da física da falha, porém necessitam de investimentos maiores. O objetivo deste trabalho é selecionar e mostrar um método que permita obter resultados mais precisos e realistas de confiabilidade, a fim de apoiar as indústrias espaciais e militares na predição de confiabilidade mais apurada dos componentes eletrônicos (EEE). Para isso, combina dados de confiabilidade de diferentes fontes/manuais, usando modelos de física da falha e/ou manual de predição da confiabilidade e/ou dados de campo.*

---

**Palavras-chave:** Métodos de Predição da Confiabilidade, Física da Falha, ALT, LDA.



## 1. Introdução

A predição da confiabilidade de equipamentos eletrônicos espaciais e militares está se tornando cada vez mais complexa, uma vez que os sistemas estão se tornando cada vez mais complexos e/ou altamente integrados. Atualmente, os requisitos de confiabilidade para produtos e sistemas espaciais e militares estão sendo cada vez mais solicitados devido às exigências cada vez mais rigorosas por parte dos interessados (*stakeholders*). Empresas que são capazes de gerir a confiabilidade de seus produtos têm significativas vantagens comerciais e tecnológicas. Neste contexto, o problema mais recorrente no desenvolvimento do produto é a predição da confiabilidade.

Nos ramos espacial e militar existem alguns métodos para a predição da confiabilidade que são imprecisos e não realistas, codificados nos manuais antigos de predição da confiabilidade de componentes eletrônicos, e/ou têm elevados custo e prazos, para dados de falhas coletados em campo ou testes de vida acelerado. Isso demonstra uma necessidade de outros métodos para a predição da confiabilidade, que tenham resultados mais precisos e realistas, com baixos custos e prazos. No entanto, isso é uma tarefa complexa especialmente para sistemas militares que possuem uma vida útil longa.

Em contrapartida, a existência de alguns métodos de predição e múltiplas fontes de dados de confiabilidade, pode ser uma vantagem para a engenharia no desenvolvimento de um novo método que seja mais preciso, mais realista e economicamente viável.

Tradicionalmente, o método para predição da confiabilidade de produtos espaciais e militares consiste em decompor o produto/sistema em combinações de subsistemas e componentes. Os componentes são analisados individualmente com os dados das múltiplas fontes ou manuais de predição da confiabilidade. As combinações dos componentes podem ser representadas em modelos lógicos de confiabilidade, como pelo Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD) e/ou, se pensarmos nas falhas dos blocos, podemos representá-los em uma Árvore de Falhas (FTA). Esses tipos de modelos associados/combinados nos fornecem dados da confiabilidade de um subsistema, sistema ou produto. O resultado disso, normalmente é mais conservador, impreciso e não realista.

Um método que permite uma maior precisão e realidade é a avaliação da física da falha, utilizando os mesmos dados das múltiplas fontes ou manuais de predição da confiabilidade como entrada para obter a taxa de falha de componentes.

Em geral as etapas para obter esses dados de confiabilidade de um componente seguindo os métodos baseados na física da falha são: (i) entender um determinado mecanismo de falha e desenvolver seu modelo correspondente, (ii) identificar aceleradores de estresse desse mecanismo de falha e (iii) planejar e implementar testes de vida acelerado para coletar dados de falha e validar o modelo.

Neste trabalho, será apresentado um método para melhorar a predição da confiabilidade, com resultados mais precisos e realistas que permitam reduzir o tempo, os recursos necessários e aumentar a precisão das estimativas de confiabilidade. Para isso, focaremos nos manuais de predição da confiabilidade com modelagem da física da falha.



## 2. Métodos

Para a predição da confiabilidade de produtos eletrônicos, geralmente são utilizados três métodos, são eles: (1) Consulta aos manuais de predição da confiabilidade; (2) Testes de Vida Acelerada (*Accelerated Life Tests-ALT*); (3) Análise de Dados de Vida (*Life Data Analysis-LDA*).

Dado a literatura e a experiência do autor foi desenvolvida a Tabela 1 que mostra a relação dos métodos com o nível hierárquico do sistema (componente, equipamento, sistema) origem dos dados, custo, complexidade e precisão. O custo está relacionado com os esforços necessários (Homem-Horas (HH)), e também com a precisão da confiabilidade. Maior custo significa maior precisão, enquanto que a complexidade está ligada à evolução do ciclo de vida do sistema (fases de: conceito, desenvolvimento, protótipo, integração, testes e etc.).

**Tabela 1. Métodos para predição da confiabilidade mostrados em relação à sua complexidade, custo e precisão.**

Métodos	Nível hierárquico	Complexidade	Origem dos Dados	Custo / Precisão
<b>Manuais de predição</b>	Componente	Baixa	Predição	Baixo
<b>Teste de vida acelerada (ALT)</b>	Equipamento	Média	Testes: protótipos, EM, QM	Médio
<b>Análise de dados de vida (LDA)</b>	Sistema	Alta	Retorno de Campo	Alto

Os manuais de predição da confiabilidade são classificados como baixa complexidade, baixo custo e baixa precisão. Este método é geralmente aplicado na fase de concepção do projeto, onde não é exigido um planejamento complexo, pois existem ferramentas de predição que podem ser facilmente usadas com apenas uma Lista de Materiais (*Bill of Materials-BOM*) existente.

Os testes de vida acelerados têm média complexidade, médio custo e média precisão, como observado na Tabela 1. Para realizar esses testes, são necessários: um protótipo ou um modelo de Engenharia (*Engineering Model-EM*) ou um Modelo de Qualificação (*Qualification Model- QM*), planejamento e preparação dos testes (câmaras de teste, sistema de captura de dados/falhas e análise dos dados).

Os dados de retorno de campo são definidos como alta complexidade, alto custo e alta precisão. Esse método é o que resulta em uma precisão maior da predição da confiabilidade, pois os componentes, subsistemas e sistema estão em funcionamento/operando com o usuário final. No entanto, obter esses dados exigiria um processo completo (política de manutenção, equipamentos de monitoração, coleta e banco de dados, retorno das análises, etc.).



Neste artigo é apresentado um método abrangendo a consulta dos manuais da predição da confiabilidade, as diferentes técnicas para obter os dados e suas limitações.

### 3 Manuais de predição

Embora não sejam precisos, tão pouco realistas, os manuais de predição da confiabilidade ainda são amplamente utilizados nas análises de produtos espaciais e militares. Isso se deve ao fato dos esforços e custos serem muito menores se compararmos com os testes de vida acelerado ou a análise de dados de retorno de campo.

O manual MIL-HDBK-217 elaborado pelo Departamento de Defesa Americano (DoD) ainda é o manual mais usado para predição da confiabilidade de produtos eletrônicos espaciais e militares. Apesar de haver algumas preocupações importantes em relação à qualidade dos resultados, o manual é usado por conta da deficiência ou atualização de manuais/guias militares disponíveis. Muitas dessas preocupações resultam principalmente dos modelos usados para calcular a taxa de falhas ( $\lambda$ ) com base na soma das taxas de falhas base multiplicada pelos fatores de qualidade/estresse:

$$\lambda_{\text{EQUIP}} = \sum_{i=1}^{i=n} N_i \lambda_g \pi_Q$$

para um determinado ambiente de aplicação temos:  $\lambda_{\text{EQUIP}}$  é a taxa de falhas total do equipamento (falhas/10<sup>6</sup> horas),  $\lambda_g$  é a taxa de falhas da  $i^{\text{th}}$  parte genérica (falhas/10<sup>6</sup> horas),  $\pi_Q$  é o fator de qualidade para a  $i^{\text{th}}$  parte genérica,  $N_i$  é a quantidade da  $i^{\text{th}}$  parte genérica,  $n$  é o número de diferentes categorias de partes genéricas no equipamento.

No entanto, esse modelo indica uma taxa de falhas constante e, portanto, o modelo da distribuição de probabilidade é exponencial. Em muitos casos, no entanto, essa indicação é inadequada. Por exemplo, os conectores falham por consequência da fadiga, e esta não segue uma distribuição exponencial e sim um outro tipo de distribuição como Weibull ou lognormal. Essa dificuldade de utilizar o manual MIL-HDBK-217 em estimar o valor da taxa de falhas dos conectores foi exposto por RABELLO e SOUZA (2011). Observamos também que os mecanismos de falha não são levados em conta. Com isso a estimativa é muito conservadora, o valor é superestimado com relação aos dados de campo. Os principais fatores de estresse e defeitos não são considerados de forma relevante. Além disso, o manual é obsoleto, os modelos são baseados em dados coletados 20 anos atrás e não leva em consideração as novas tecnologias. Os resultados finais das estimativas baseadas no manual MIL-HDBK-217F são valores muito conservadores, superestimados e não realistas.

Um método alternativo para a predição de confiabilidade, levando em conta as tecnologias eletrônicas modernas (semicondutores, circuitos integrados, microcontroladores, FPGAs, etc.) é usar a física da falha para compreender os mecanismos de falha e prever falhas sob diferentes tipos de stress (vibração, térmico, ciclo térmico, umidade, salinidade e etc.).

#### 3.1. Melhoria dos métodos de predição da confiabilidade

Os dois principais problemas que surgem nos métodos utilizados para a predição da confiabilidade de equipamentos eletrônicos espaciais e militares são: (1) os métodos não resultam em predições realistas/precisas, e (2) os métodos não são eficientes em termos de



custos, esforços e prazos necessários para preparação, execução e análise. Para aumentar a precisão e diminuir o custo, como é normalmente exigido pelos interessados (*stakeholders*), um método baseado na física da falha será mostrado neste artigo, permitindo que as empresas aumentem a confiabilidade e aprimorem a predição da confiabilidade de equipamentos eletrônicos.

Analisando os manuais de predição da confiabilidade disponíveis, foram identificados dois manuais mais recentes, que foram selecionados para avaliação adicional: IEC TR 62380 e FIDES.

Embora o manual IEC TR 62380 seja mais recente que o manual MIL-HDBK-217F, ele não é atualizado desde 2003. Como consequência, os modelos para a física da falha não são adaptados para as novas tecnologias. Além disso, o manual IEC TR 62380 não considera o ciclo de vida completo do produto na avaliação de confiabilidade. O manual MIL-HDBK-217F resulta em predições muito conservadoras e pessimistas, já o manual IEC TR 62380 resulta predições muito otimistas.

O manual de predição da confiabilidade FIDES, publicado em 2009, inclui informações de confiabilidade de tecnologias mais recentes e considera o ciclo de vida completo na avaliação da confiabilidade de um produto, além de fazer uso de diferentes modelos da física da falha para descrever os mecanismos de falha.

Analisando os manuais de predição da confiabilidade foi elaborada a Tabela 2, que apresenta uma comparação dos manuais MIL-HDBK-217, IEC TR 62380 e FIDES, com os pontos mais relevantes para a indústria militar e espacial.

**Tabela 2. Comparação entre MIL-HDBK-217, IEC TR 62380 e FIDES.**

<b>Manuais</b>	<b>MIL-HDBK-217</b>	<b>IEC TR 62380</b>	<b>FIDES</b>
<b>Parâmetros</b>			
Origem	Departamento de Defesa Americano	France Telecom RDF2000	Airbus, Thales (indústria)
Última atualização	1995	2003	2009
Faixa de uso	Militar, indústria	Principalmente telecomunicações	Aviônica, militar
Física da falha	Não adaptada (somente temperatura)	Não adaptada (falta umidade e vibração)	Baseada na física da falha
Fases operacionais e não operacionais	Válida apenas para a fase operacional	Válida apenas para a fase operacional	Válida para todas as fases do ciclo de vida



Ciclo de vida	Não considerado	Não considerado	Válida para todas as fases do ciclo de vida
Tecnologia Atual	Não adaptada	Não adaptada	Adaptada
Dados de predição	Não realista	Não realista	Realistas com dados de campo
Itens COTS	Não considerado	Não considerado	Considerado

O Manual FIDES usa o seguinte modelo para prever a confiabilidade:

$$\lambda = \lambda_{física} \pi_{fabricação} \pi_{processo}$$

Diferente do modelo utilizado no manual MIL-HDBK-217F, a predição da confiabilidade pelo modelo proposto pelo manual FIDES, depende de uma combinação da contribuição física  $\lambda_{física}$  (devido ao estresse térmico, mecânico, ...), a qualidade e o controle técnico da fabricação dos componentes ( $\pi_{fabricação}$ ) e a qualidade e o controle do processo de desenvolvimento, fabricação e operação do produto que contém o componente analisado ( $\pi_{processo}$ ).

Como exemplo, de um modelo do manual FIDES, o resistor tem como fatores contribuintes para  $\lambda_{física}$ : estresse termoeletrônico ( $\pi_{Thermo-electrical}$ ), estresse do ciclo térmico ( $\pi_{TCy}$ ), estresse mecânico ( $\pi_{Mechanical}$ ) e estresse provenientes da umidade ( $\pi_{RH}$ ). Os respectivos modelos de estresse são em função dos parâmetros de potência elétrica, temperatura, vibração, umidade e tempo. Isso pode ser visto na Figura 1.

$\Pi_{Thermo-electrical}$	<p>In an operating phase:</p> $\gamma_{TH-EL} \times e^{11604 \times 0.15 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{\left( T_{board-ambient} + 273 + \Lambda \times \frac{P_{applied}}{P_{rated}} \right)} \right]}$ <p>In a non-operating phase: <math>\Pi_{Thermo-electrical} = 0</math></p>
$\Pi_{TCy}$	$\gamma_{TCy} \times \left( \frac{12 \times N_{annual-cy}}{t_{annual}} \right) \times \left( \frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\Delta T_{cycling}}{20} \right)^{1.9} \times e^{1414 \times \left[ \frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{max-cycling} + 273)} \right]}$
$\Pi_{Mechanical}$	$\gamma_{Mech} \times \left( \frac{G_{RMS}}{0.5} \right)^{1.5}$
$\Pi_{RH}$	$\gamma_{RH} \times \left( \frac{RH_{ambient}}{70} \right)^{4.4} \times e^{11604 \times 0.9 \times \left[ \frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{board-ambient} + 273)} \right]}$ <p>In an operating phase: <math>\Pi_{RH} = 0</math></p>

Figura 1. Modelo de física da falha proposta pelo manual FIDES.



Na Figura 1 tem-se respectivamente: para estresse termoelétrico ( $\pi_{Thermo-electrical}$ ),  $\gamma_{TH-EL}$  é a taxa de falhas base no estresse termoelétrico nominal,  $T_{board-ambient}$  é a temperatura entre a placa de circuito impresso e o ambiente,  $A$  é área de dissipação de potência,  $P_{applied,rated}$  é a potência aplicada e nominal; para o estresse do ciclo térmico ( $\pi_{TCy}$ ),  $\gamma_{TCy}$  é a taxa de falhas base do estresse no ciclo térmico nominal,  $N_{annual-cy}$  é o número anual de ciclos térmicos,  $t_{annual}$  é número de horas de operação anual,  $\theta_{cy}$  é a duração do ciclo térmico,  $\Delta T_{cyclinng}$  é a amplitude de uma fase do ciclo térmico,  $T_{max-cyclinng}$  é a temperatura máxima em um ciclo; para o estresse mecânico ( $\pi_{Mechanical}$ ),  $\gamma_{Mech}$  é a taxa de falhas base do estresse mecânico nominal,  $G_{RMS}$  é a amplitude do estresse de vibração aleatória aplicada; e para o estresse proveniente da umidade ( $\pi_{RH}$ ),  $\gamma_{RH}$  é a taxa de falhas base do estresse proveniente da umidade nominal,  $RH_{ambient}$  é a umidade ambiente e  $T_{board-ambient}$  é a temperatura entre a placa de circuito impresso e o ambiente.

Em um experimento realizado pela Direção Geral de Armamentos Francês (DGA) (DAVENEL et alli, 2007), foi avaliado um rádio de comunicação militar composto por 5942 componentes eletrônicos. Para isso, foram observados 2000 rádios integrados/instalados no campo (Exército Francês) desde 1994, operando mais que 500 bilhões de horas; e retornando de campo 500 a 800 dados de componentes por ano, analisados por 12 anos. O resultado do experimento é apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3. Experimento comparativo entre MIL-HDBK-217 e FIDES.**  
(Fonte:(DAVENEL et alli, 2007))

Rádio Militar	Taxa de falhas (FIT ou $10^{-9}$ /h)			Relações	
	MIL-HDBK-217F	FIDES	Dados de Campo	MIL / Dados de campo	FIDES / Dados de campo
<b>5942</b>	<b>326433</b>	<b>4892</b>	<b>5886</b>	<b>55,5</b>	<b>0,8</b>

Assim, a utilização de manual de predição da confiabilidade FIDES resultaria em dados mais precisos e realistas que permitiriam reduzir o tempo/recurso necessário e aumentar a precisão das estimativas de confiabilidade.





#### 4. Conclusão

Neste artigo, resumiu-se um método para melhorar a predição da confiabilidade, ressaltando a importância da modelagem de análise da física da falha. Este método é baseado principalmente no manual melhorado de predição da confiabilidade. As melhorias descritas em relação ao estado da arte e as práticas comuns demonstram eficácia nas indústrias do ramo militar e espacial. Essas melhorias são imediatamente entendidas quando se comparam os parâmetros/suposições dos métodos atuais com o proposto neste artigo. Frequentemente, são feitas suposições incorretas, como taxa de falhas constante e/ou métodos para tecnologias ou processos desatualizados. Por meio da modelagem de análise da física da falha (PoF), vislumbram-se melhorias nos métodos atuais, inserindo mais foco nas análises da física da falha, resultando em melhores estimativas da predição da confiabilidade.

A predição da confiabilidade é um tópico necessário para significativas vantagens comerciais e tecnológicas. As empresas precisam de ferramentas certas para permitir estimativas precisas e otimizadas para a predição da confiabilidade. Acreditamos que o método resumido tem o potencial de contribuir para atingir esses objetivos.

#### Referências

DAVENEL F., RICHIN P., MOREAU C. Experimentation of the new reliability prediction method FIDES.2007. 39 slides. Disponível em: <[https://eepitnl.tksc.jaxa.jp/mews/en/20th/data/1\\_10.pdf](https://eepitnl.tksc.jaxa.jp/mews/en/20th/data/1_10.pdf)>

DEPARTMENT OF DEFENSE, **Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F**. Washington DC, 1991. 205p.

DEPARTMENT OF DEFENSE, **Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F (Notice 1)**. Washington DC, 1992. 37p.

DEPARTMENT OF DEFENSE, **Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F (Notice 2)**. Washington DC, 1995. 80p.

FIDES GROUP. **FIDES Guide 2009**. Edition A UTE\_Guide\_FIDES\_2009\_Ed\_A\_EN 2009. 465p.

IEC. **Reliability data handbook – Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment**. IEC TR 62380. 2003. 96p.

RABELLO, A. P. S. S., SOUZA, M. L. O. **Relatório de comparação entre os métodos de cálculo para obtenção da taxa de falhas dos conectores “Retangular” e “Rack and Panel” do China Brazil Earth Resources Satellite CBERS 3&4**. INPE, S. J. Campos, SP, dezembro de 2011.

RELIASOFT CORPORATION, **Reliability Engineering Resource Website**. Desenvolvido por Reliasoft. Disponível em: <<http://www.weibull.com/>>.