



Proposta de uma Metodologia para considerar os efeitos da radiação no cálculo das taxas de falha de componentes eletrônicos

Josemara Conceição de Mendonça Flausino¹, Silvio Manea¹, Juliano Quadro Moreira^{1,2}

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluna de Mestrado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE.

²Msc. Engenheiro Eletrônico de Testes do Grupo de Radiação – (Bolsista PCI)

josemara_sjc@hotmail.com

Resumo. *Algumas das principais dificuldades enfrentadas durante o processo de concepção de um sistema espacial são os efeitos da radiação proveniente do Sol que provocam efeitos de curto e longo prazo. Os componentes eletrônicos para uso espacial precisam ter uma alta confiabilidade, pois não existem meios de se realizar manutenção no espaço. O presente artigo indica uma metodologia baseada na norma MIL-HDBK-217F que considere os efeitos da radiação no cálculo da taxa de falhas e nos modos de falha que impactarão diretamente na confiabilidade dos componentes do sistema.*

Palavras-chave: Efeitos da Radiação; Componentes Eletrônicos; Taxa de Falha; Confiabilidade.

1. Introdução

O Ambiente Espacial é hostil e oferece riscos às missões espaciais, principalmente aos satélites que estão posicionados em órbita, devido às altas taxas de radiação provenientes de eventos astronômicos, tais como: Raios Cósmicos Galácticos e Ventos Solares, que incidem diretamente sobre os satélites (Norberg, 2013). Os danos causados pela radiação vão desde falhas que ocorrem em nível de sistema, até a perda total de um equipamento/subsistema. Os prejuízos para a perda de subsistemas custam na ordem de milhões de dólares (Eduardo et. al., 2011)

Com desenvolvimento tecnológico os sistemas estão cada vez mais integrados, diminuindo seu tamanho e aumentando sua suscetibilidade aos efeitos da radiação, num cenário inóspito como a órbita terrestre um componente deve ter uma alta confiabilidade, pois as exigências de funcionamento são grandes e a manutenção dos equipamentos é geralmente impossível, deste modo estudar como os efeitos da radiação influenciam diretamente na confiabilidade dos componentes é um avanço importante no desenvolvimento de satélites gerando melhorias no processo e redução de custos.

O artigo apresenta uma metodologia que considere a influência da radiação na taxa de falha dos componentes que impactará diretamente nas análises de confiabilidade feitas durante o processo de desenvolvimento da missão espacial.



2. Metodologia

2.1. Ambiente Espacial

De acordo com (Barth, Dyer e Stassinopoulos, 2003), o ambiente espacial pode ser classificado em duas populações: a radiação aprisionada que consiste em partículas carregadas que são capturadas pelo campo magnético da Terra e forma os cinturões de Van Allen, incluindo prótons, elétrons e íons pesados, e a radiação transitória que chega até nós através dos raios cósmicos galácticos (RCG) e os eventos solares, esse tipo de radiação é composto por partículas mais energéticas como partículas alfa, íons pesados e nêutrons.

2.1.1. Radiação Aprisionada

Parte das partículas que chegam à Terra a todo o momento são aprisionadas pelo Campo Magnético e formam uma espécie de cinturão. Os cinturões de Van Allen foram descobertos em 1958 pelo cientista americano James Van Allen através dos experimentos realizados durante a missão de pesquisa do satélite Explorer I. As pesquisas mostraram que existem dois cinturões: o cinturão interno e o cinturão externo.

O cinturão interno é composto por prótons altamente energéticos e está localizado entre 700km e 10.000km de altitude e as partículas presentes nele se originam principalmente do impacto dos Raios Cósmicos Galácticos na atmosfera terrestre.

O cinturão externo que se estende por uma faixa entre 13.000km e 65.000km de altitude e é composto por elétrons de alta energia cuja fonte são os eventos solares que interagem com o campo magnético da Terra (Li e Hudson, 2019).

2.1.2. Radiação Transitória

- **Raios Cósmicos Galácticos (RCG):** Os raios cósmicos galácticos são partículas de alta energia que se originam de regiões fora do sistema solar, acredita-se que sejam formados devido a resíduos de explosões de supernovas. A composição dos RCG é basicamente 85% de prótons (Núcleos de Hidrogênio), 14% de partículas alfa (Núcleos de Hélio) e 1% de íons pesados como urânio, ferro e chumbo (Blasi, 2013).
- **Eventos Solares:** Eventos solares são eventos nos quais as partículas carregadas provenientes do Sol chegam até a Terra. Dentre eles podemos citar: **O vento solar** que é a liberação constante de partículas energéticas que viajam pelo sistema solar. Existem as **Explosões solares** que consistem em explosões energéticas na superfície do Sol que enviam milhares de prótons em direção a Terra. Segundo (Shea e Smart, 1990) cada explosão solar é única, portanto a geração das emissões varia de evento para evento. As principais partículas emitidas são: partícula alfa, elétrons e íons pesados (Manea, 2019). E por fim temos as **Ejeções de Massa Coronal (EMC)**, são explosões nas quais o Sol ejeta uma grande quantidade de plasma, essas ejeções podem ser muito nocivas aos satélites (Schrijver *et al.*, 2012).



2.2. Efeitos da Radiação em Componentes Eletrônicos

A radiação de partículas quando em contato com componentes eletrônicos possui diferentes tipos de interação que podem ser classificadas em três tipos: Radiação de Dose Total Ionizante (*Total Ionizing Dose – TID*), Dano por Deslocamento (*Displaced Damage – DD*) e o Efeito de Evento Único (*Single Event Effect – SEE*) (Junqueira e Manea, 2020).

2.2.1. Dose Total Ionizante

De acordo com (ECSS, 2010) a dose total ionizante pode ser definida como a quantidade de energia depositada por ionização ou excitação em um material por unidade de massa. Quando as partículas carregadas atingem os componentes eletrônicos já uma interação entre eles que gera um par contendo um elétron livre e uma lacuna do átomo atingido. Apesar dessa liberação, com o funcionamento do circuito as cargas acabam por se recombinar eliminando esses pares, entretanto nem todas as cargas são absorvidas e se acumulam prejudicando o desempenho do componente (Machado, 2014).

2.2.2. Dano por Deslocamento

O Dano por deslocamento é definido como um efeito cumulativo de radiação, que causa danos à estrutura cristalina dos materiais semicondutores e alguns materiais ópticos devido à colisão de partículas de alta energia. O dano por deslocamento é em sua maioria observado em materiais optoeletrônicos, dispositivos bipolares e células solares. O dano por deslocamento ocorre quando uma partícula altamente energética atinge a rede cristalina de um material com força suficiente para deslocar o núcleo dos átomos presentes na rede, essa interação é capaz de mudar as características eletrônicas do componente. (Arruda, 2006).

2.2.3. Evento de Efeito Único

Os eventos de efeito único acontecem quando os íons altamente energéticos passam pelos semicondutores de um componente e produzem uma trilha de pares elétron-lacuna que geram uma série de fenômenos físicos. Essas falhas geralmente são ocasionadas por uma única partícula que atravessa uma região sensível do material (ECSS, 2010). Os eventos de efeito único podem ser subdivididos em eventos de efeito único destrutivos que provocam um dano permanente no componente e eventos de efeito único não destrutivos que causam falha no dispositivo, mas podem ser corrigidos com ações simples, como reset do sistema.

2.3. Confiabilidade

Segundo a (ECSS, 2012), confiabilidade pode ser definida como “*A Capacidade de um item realizar sua função requerida de acordo com as condições estabelecidas por um dado intervalo de tempo*”, ou seja, um item é confiável se ele funciona pelo tempo para o qual é projetado sem falhar.

2.3.1. Predição e taxa de falha

2.3.1.1. Predição

A predição de confiabilidade nada mais é do que uma técnica de análise de confiabilidade utilizada pelo INPE, cujo principal objetivo é avaliar um equipamento ou sistema e estimar a taxa de falhas do mesmo.



O Manual MIL-HDBK-217F apresenta uma metodologia para realizar uma Predição de Confiabilidade e define seu objetivo como: “Prever através de uma avaliação de predição de confiabilidade a capacidade de um projeto manter um nível de confiabilidade aceitável sob condições ambientais extremas”(MIL-HDBK-217F, 1991).

De acordo com (Porto, 2014), a predição é uma ferramenta limitada, pois as taxas são calculadas apenas com base nos dados disponíveis, de modo que só funciona sob as mesmas condições nas quais os dados foram obtidos, por exemplo, nas condições ambientais como temperatura e pressão atmosférica, além disso, essa técnica só é utilizada para os componentes que são previstos pelo manual não podendo ser aplicada em outros tipos de componentes.

2.3.1.2. Taxa de Falhas

A taxa de falhas é uma função que determina o índice de falhas num produto em um intervalo de tempo pré- estabelecido. Quando se trata de “estudar a falha” um método de análise eficiente é através do gráfico denominado “Curva da Banheira”, apresentado na Figura 2.1.

A curva da banheira expressa a taxa de falhas em função do tempo, na porção inicial da curva estão representadas as falhas imediatas, onde os componentes ou produtos que já foram fabricados com algum tipo de defeito são descartados logo nos primeiros exames de qualidade feitos em fábrica. A parte central da curva representa o tempo de vida útil, onde a taxa de falhas é baixa e constante e o produto cumpre a função para o qual foi manufaturado, e por fim temos a última etapa da curva, onde está representado o período de desgaste, sendo a fase em que a taxa de falhas volta a crescer e os produtos falham devido ao desgaste de uso (Lewis, 1994).

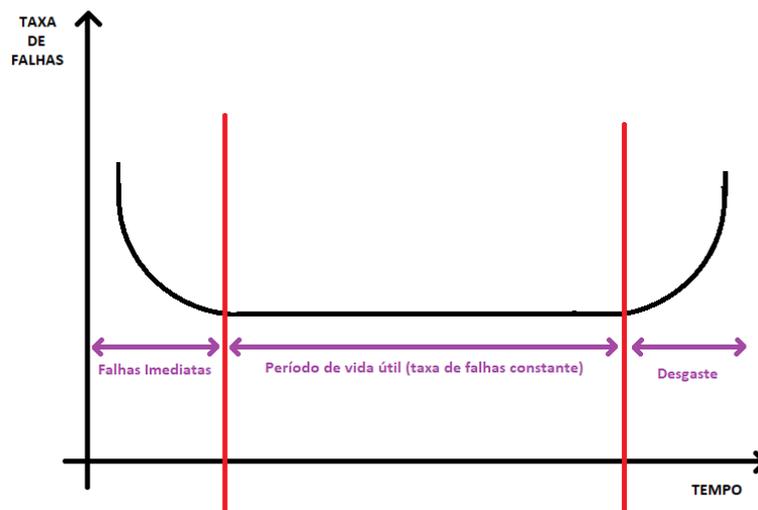


Figura 1. “Curva da Banheira”. [Fonte: Adaptado de Fogliato e Ribeiro, 2011]



2.3.2. Metodologia para realizar uma predição

A MIL-HDBK-217F estabelece dois métodos de predição de confiabilidade, um para projetos com grau de maturidade maior, onde os dispositivos já estão sendo projetados que é denominado “*Part Stress Analysis Method*”, ou método por análise de esforços das partes, e o outro método que se aplica a projetos com um menor grau de maturidade, nas fases iniciais de concepção é chamado “*Parts Count Method*”, ou método por contagem de partes (Neto, 2014).

2.3.2.1. Método por análise de esforços das partes

$$\lambda_p = \lambda_b \times \pi_Q \times \pi_E \times \pi_T \times \pi_A \times \pi_R \times \pi_S \times \pi_C$$

Onde,

λ_p - é a taxa de falhas da parte estudada;

λ_b - é a taxa de falhas base para a parte, na qual são expressos os esforços que a parte irá sofrer.

π_Q - é o fator de qualidade que está relacionada à fabricação da parte.

π_E - é o fator do ambiente em que a parte está operando, que influencia diretamente na taxa de falhas.

Os parâmetros π_Q e π_E estão presentes em todas as análises do tipo, já os demais parâmetros associados à π variam de acordo com a parte estudada e as condições de funcionamento, por exemplo, a temperatura ambiente.

2.3.2.2. Método por contagem de partes

A MIL-HDBK-217F prevê que para realizar o método de predição por contagem de partes são necessários os dados genéricos e também os níveis de qualidade relacionados à fabricação e as características ambientais, em posse desses dados é possível realizar uma predição através da aplicação da seguinte fórmula.

$$\lambda_{EQUIPAMENTO} = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_g \times \pi_Q)_i$$

Onde,

$\lambda_{EQUIPAMENTO}$ - é a taxa de falhas do equipamento que será projetado.

λ_g - é a taxa de falhas genérica para todos os tipos de partes que estão presentes no equipamento.



π_Q - é o fator de qualidade de todos os tipos de partes que estarão presentes no equipamento, vale ressaltar que este fator de qualidade está relacionado com a fabricação.

N_i - consiste no número de partes que estarão presentes dentro do equipamento estudado.

n - este fator indica a quantidade de partes diferentes que estarão presentes dentro do equipamento.

2.3.3. Distribuições de probabilidade

As distribuições de probabilidade consistem em modelos matemáticos que relacionam certo valor da variável que está sendo estudada com a probabilidade que essa variável ocorra.

Existem dois tipos de distribuição de probabilidade: As distribuições **Contínuas** que são utilizadas quando a variável é expressa em uma escala contínua, ou seja, os valores possíveis são intervalos infinitos e incontáveis. O outro tipo de distribuição de probabilidade são as **Discretas** que são aplicadas quando a variável analisada só pode assumir certos valores, ou seja, os valores das variáveis são contáveis, como por exemplo, uma lista de números inteiros (Paternelli, 2010).

3. Resultados esperados

- **Metodologia para considerar os efeitos da radiação na taxa de falha dos componentes eletrônicos**

Para calcular as taxas de falha considerando os efeitos da radiação, podemos tomar como base o estudo de (Ferraro *et al.*, 2017) que propõe uma metodologia para tal finalidade.

3.1. Distribuição para falhas por efeitos de radiação cumulativos

Quando os efeitos da radiação são cumulativos, ou seja, Efeitos de Dose Total Ionizante e Dano por Deslocamento, às distribuições de probabilidade são feitas por uma distribuição lognormal conforme a equação apresentada.

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Onde, μ é a Média, calculada por:

$$\mu = \ln(m) - \frac{v}{2}$$



E σ é a variância, calculada por:

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{v}{m^2}\right)}$$

3.2. Distribuição considerando falhas por efeito de evento único

Para uma primeira aproximação, consideramos que as falhas de SEE constantes no tempo, usando assim o modelo de distribuição exponencial conforme a equação:

$$f(t) = \lambda_{SEE} \exp(-\lambda_{SEE} t)$$

Considerando que λ_{SEE} é a taxa de falhas devido ao SEE, logo, para cada tipo de partícula analisada são utilizadas fórmulas diferentes para calcular a taxa de falhas.

Quando as partículas são Prótons e Nêutrons desconsidera-se o ângulo de incidência e calcula-se a taxa de falhas pela seguinte equação:

$$\lambda_{particula} = \int_0^E \frac{d\phi_{particula}(E)}{dE} \sigma_{particula}(E) dE$$

Neste caso, $\phi_{particula}(E)$ é o espectro do fluxo de prótons ou nêutrons e $\sigma_{particula}(E)$ é a seção transversal nas diferentes energias.

Quando o SEE é causado pela incidência de íons, simplificando-se o ângulo de incidência, então descreve-se a taxa de falhas pela equação:

$$\lambda_{ion} = \int_0^{LET} \frac{d\phi_{ion}(LET)}{dLET} \sigma_{ion}(LET) dLET$$

Onde: $\phi_{ion}(LET)$ é o espectro do fluxo de íons, $\sigma_{ion}(LET)$ é a seção transversal em função do LET.

Essas equações descritas acima podem ser usadas tanto para efeitos de evento único destrutivos, quanto para efeitos de evento único não destrutivos.



4. Conclusão

Neste artigo discorremos sobre a radiação proveniente do espaço e os efeitos que são observados na interação das partículas altamente energéticas com os componentes eletrônicos utilizados em satélites. Considerando essa problemática é importante que os componentes enviados ao espaço tenham uma alta confiabilidade devido à impossibilidade de se fazer manutenção de satélites no espaço, com base nesse panorama levantando uma importante questão quando se pensa em projeto de satélites, como considerar os efeitos da radiação no cálculo das taxas de falha dos componentes voltados para o uso espacial? A metodologia apresentada por (Ferraro *et al.*, 2017) demonstra que através de uma distribuição de probabilidade lognormal é possível incluir os efeitos de TID e SEE nas representações matemática. Esse estudo dá uma nova perspectiva para o desenvolvimento de satélites demonstrando que é possível aumentar a confiabilidade dos componentes ao incluir os efeitos da radiação no cálculo das taxas de falha. O presente artigo trata de uma abordagem inicial e a busca por uma solução, as próximas etapas para o desenvolvimento e aprimoramento desta metodologia se dá através da elaboração de um estudo de caso no âmbito das pesquisas do INPE afim de validar a metodologia para que futuramente possa ser incorporada nas missões espaciais desenvolvidas pela instituição.

Agradecimentos: Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela pós graduação oferecida e ao meu orientador Dr. Silvio Manea.



Referências

- ARRUDA, T. M. **Análise da Influência da Radiação em Circuitos Eletrônicos**. [s.l.] Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006.
- BARTH, J. L.; DYER, C. S.; STASSINOPOULOS, E. G. Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50 III, n. 3, p. 466–482, 2003.
- BLASI, P. **The origin of galactic cosmic rays**. [s.l: s.n.]. v. 21
- ECSS. Space engineering - Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook. **Ecss-E-Hb-10-12a**, n. December, p. 1–174, 2010.
- ____. ECSS system - Glossary of terms. n. October, p. 63, 2012.
- EDUARDO, J.; COSTA, R.; NARDIN, C. M. D. Em que escala os efeitos do C Clima Espacial afetam a sociedade ? Workshop do Programa de Clima Espacial do INPE com Usuários, p. 1–13, 2011.
- FERRARO, R. *et al.* Estimation of System Survival Reliability in a Radiation Environment Based on the Available Radiation Data at Component Level. **2017 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, RADECS 2017**, 2017.
- Fogliato, F. S. and Ribeiro, J. L. D. (2011) **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1st edn. Rio de Janeiro: Elsevier Editora LTDA.
- JUNQUEIRA, B. C.; MANEA, S. Utilização de cots em nano satélites. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1476–1490, 2020.
- LEWIS, E. E. Introduction to Reliability Engineering. *In*: 2. ed. Evanston: [s.n.]. p. 1–9.
- LI, W.; HUDSON, M. K. Earth's Van Allen Radiation Belts: From Discovery to the Van Allen Probes Era. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 11, p. 8319–8351, 2019.
- MACHADO, S. R. F. Estudo de um processo de garantia da confiabilidade do sistemas eletrônicos a single event upsets causados por partículas ionizantes. 2014.
- MANEA, S. **Course CSE-342-4 Introduction to the Space Radiation Effects on Satellites Space Radiation – M2-1**São José dos Campos Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, , 2019.
- MIL-HDBK-217F. Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment. **MIL-HDBK-2017F**, v. 85498, n. June, p. 1–16, 1991.
- NETO, A. V. DA S. Modelo de predição de falhas baseado em processos estocásticos e filtragem Kalman para suporte à manutenção preditiva de sistemas elétricos, eletrônicos e programáveis. p. 302, 2014.
- NORBERG, C. The space environment. **Human Spaceflight and Exploration**, p. 65–119, 2013. Disponível em: <https://www.faa.gov/about/office{ }org/headquarters{ }offices/avs/offices/aam/cami/library/online{ }libraries/aerospace{ }medicine/tutorial/media/III.4.1.2{ }The{ }Space{ }Environment.pdf>.
- PETERNELLI, L. A. Capítulo 1 – Introdução a Probabilidade Capítulo 2 – Variáveis aleatórias e distribuição de probabilidade. p. 47–67, 2010.
- PORTO, R. DE C. F. Análise e Comparação dos Manuais da Família MIL-HDBK-217F e Proposta de Melhoria de Processos de Confiabilidade de Equipamentos Eletrônicos Espaciais. p. 393, 2014.
- SCHRIJVER, C. J. *et al.* Estimating the frequency of extremely energetic solar events, based on solar, stellar, lunar, and terrestrial records. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 117, n. 8, p. 1–17, 2012.
- SHEA, M. A.; SMART, D. F. A Summary of Major Solar Proton Events. **Solar Physics**, v. 127, p. 297–320, 1990.