



Processo de seleção de Componentes EEE e o processo de RHA

Jonilson Adachi ¹, Prof. Dr. Silvio Manea ²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Tecnologias Espaciais - ETE.

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Eng. Da Radiação, São José dos Campos, SP, Brasil

jonilson.adachi@inpe.br

Resumo. *O artigo faz uma breve descrição do processo de seleção de componentes EEE e do processo de RHA no contexto de seleção de componentes EEE para aplicação espacial, ambos os processos sob a percepção das normas da ESA, normas adotadas pelo INPE.*

Palavras-chave: Seleção; Componentes; EEE; RHA; Radiação

1. Introdução

Em missões espaciais, um dos fatores importantes para cumprir a missão é a confiabilidade do sistema necessária para a missão. Para alcançar a confiabilidade necessária, cada parte do sistema, em todos os níveis, deve se ter a confiabilidade adequada. Os componentes eletrônicos, elétricos e eletromecânicos (EEE), são um dos itens básicos que formam o sistema e é comum encontrar itens críticos para o funcionamento do sistema entre esse grupo. Por serem sensíveis ao ambiente espacial, em especial à radiação, os componentes EEE utilizados em sistemas espaciais, passam por rígidos processos e controle de fabricação, sendo submetidos à seleção e a diversos testes para garantirem a sua confiabilidade. Um dos processos importantes pelo qual os componentes EEE passam é o processo de RHA (Radiation Hardness Assurance), o qual tem como objetivo garantir que esses dispositivos funcionem de acordo com suas especificações do projeto, em exposição à radiação espacial. Este artigo tem como objetivo descrever o processo de seleção de componentes EEE, de acordo com a norma ESA ECSS-Q-ST-60C Rev.2 e o processo de RHA no contexto de seleção de componentes EEE, de acordo com a ESA ECSS-Q-ST-60-15C. [ESA-ESTEC/ESCC]

2. Metodologia

Foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre o processo de seleção de componentes EEE e o processo de RHA no contexto de seleção de componentes EEE, nas normas da ESA, que são adotadas pelo INPE. Com as informações dos processos da ESA, foi feito um paralelo com as nomenclaturas utilizadas pelo INPE.



3. Resultados e Discussão

3.1. Seleção e avaliação de componentes EEE

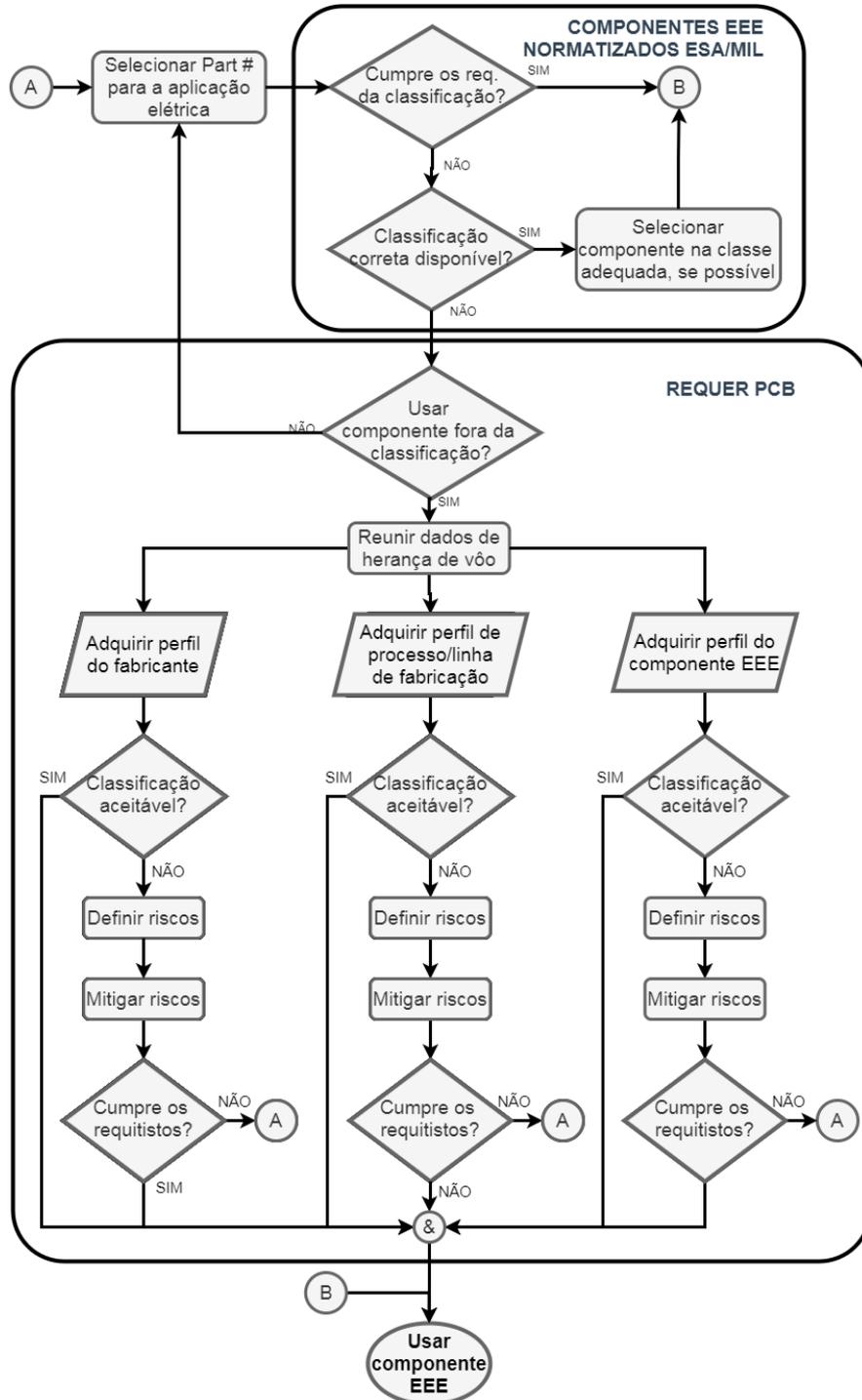


Figura 1: Processo de avaliação de componente EEE selecionado para uso no projeto. [ESA ECSS-Q-ST-60-15C, 21 October 2013]



A seleção de componentes para aplicação espacial não se limita a atender os requisitos de projeto elétrico, pois é necessário que o sistema atenda aos requisitos de missão/sistema em todos os níveis, suportando as condições do ambiente espacial.

Agências como a NASA e a ESA mantêm uma série de normas de processos qualificação e requisitos para a seleção, controle, aquisição e uso de componentes de EEE. Esses dispositivos devem seguir especificações de fabricação com rígido controle de fabricação e testes para garantir a qualidade e confiabilidade do componente EEE.

O INPE adotou o processo de seleção e avaliação de componentes EEE baseados nas normas da ESA, utilizada com algumas adaptações para as condições de trabalho apresentadas no Brasil. Na Figura 1, o processo inicia com a seleção do componente para a aplicação elétrica do projeto do circuito ou sistema, feito pelos projetistas da engenharia, onde são criadas listas de componentes EEE (LC). Essas LCs são passadas para a engenharia de componentes, onde serão levantados os dados dos componentes, como especificações e testes aplicados.

Cada componente é analisado através de seus dados, que são confrontados com os requisitos de componentes criado especificamente para o projeto. É feita uma triagem documental e é pedido mais informações, caso o componente não atenda as informações mínimas exigidas.

Na política de componentes há uma grade de qualidade de componentes EEE, o qual descreve os níveis de qualidade e os testes exigidos para a utilização do componente EEE para cada modelo adotado pelo projeto.

Caso o componente seja qualificado e cumpra com todos os requisitos exigidos para a missão, dentro da classificação de qualidade exigida, o componente é aceito para o projeto. Mas caso o componente não cumpra, mesmo um componente qualificado militarmente, deve ser analisado seus dados de herança de voo, onde são analisados os dados do fabricante, de fabricação do lote e sobre o projeto do componente. Com esses dados, são reunidos especialistas em um comitê chamado Parts Control Board (PCB), onde analisarão os dados obtidos para decidir se são satisfatórios ou se são necessários mais dados e caso seja necessário, serão aplicados testes e inspeções a fim de avaliar melhor o componente.

3.2. Seleção de componentes EEE

Durante o processo de seleção, a fim de atender os requisitos de desempenho, vida útil, meio ambiente, material, segurança, qualidade e confiabilidade do sistema, são analisados os dados confrontando com os requisitos do projeto, de design, de produção e operacionais.

Os componentes são selecionados de acordo com a sua rastreabilidade, onde são analisados os documentos que comprovem a sua qualificação, caracterização e histórico de voo, além de dados relevantes para o programa de seleção de componentes ou sobre o fabricante.

Através do aprendizado das agências espaciais sobre componentes e materiais que oferecem riscos para a missão e para a saúde dos operadores, foi uma lista de restrições de utilização de componentes e materiais que possuem as seguintes características:

- Componentes não hermeticamente selados, com vida útil limitada, com instabilidade conhecida, com riscos de segurança ou razões de risco de confiabilidade.



- Materiais que liberam gases, inflamáveis, tóxicos e que causam riscos de segurança para o sistema ou para a saúde dos operadores.

3.2.1.1. Fontes confiáveis

Outra medida adotada pelas agências espaciais a é a adoção de fontes preferidas de componentes EEE, que possuem um histórico de voo e são fabricados de acordo com as especificações para aplicação espacial: ESA EPPL parte I e EPPL parte II , NPSL nível 1 e nível 2 ou 3, MIL QPL's e QML's.

3.2.1.2. ITAR

Uma das restrições para a seleção de componentes é o ITAR (International Traffic in Arms Regulations), um regime regulatório dos Estados Unidos para restringir e controlar a exportação de tecnologias relacionadas com defesa e militares para salvaguardar a segurança nacional dos Estados Unidos e outros objetivos da política externa dos Estados Unidos.

[NASA Export Control Program Operations Manual, October 10, 2017]

O ITAR é administrado pelo DoS, controlando as exportações de bens e dados técnicos classificados na Lista de Municações dos Estados Unidos (USML), que inclui 21 categorias de artigos e serviços de defesa enumerados e requerem uma licença ou isenção de licença para serem exportados, como o END USER.

3.2.1.3. Dureza de radiação ou *Radiation Hardness*

Os requisitos de radiação para seleção de componentes EEE são específicos de cada projeto, considerando a órbita e trajetória da missão, a duração, as variações espaciais e temporais associadas do ambiente de radiação, bem como todos os fatores de proteção, como blindagem.

Os componentes selecionados devem demonstrar a conformidade com as restrições de radiação do projeto, levando em consideração todos os tipos de radiação incluindo cósmica (íons pesados), eletromagnética, aprisionada (partículas carregadas - elétrons, prótons - em cinturões de radiação) e solar (flares e CME), demonstrando documentalmente a sensibilidade à dose total ionizante (TID), dano por deslocamento (DD) e Efeitos de Eventos Únicos (SEE), de acordo com a norma ECSS-Q-ST-60-15C - Space product assurance - Radiation hardness assurance - EEE components.

3.2.1.4. Derating

O derating é uma prática consagrada aplicada e com benefícios comprovados para o sistema, que consiste na redução do estresse aplicado aos componentes EEE, de acordo com a ECSS-Q-ST-30-11 - Space product assurance - Derating - EEE components. No entanto, o mau dimensionamento, pode aumentar o custo do projeto e o superdimensionamento dos componentes, conseqüentemente aumentando o volume e massa. A ESA utiliza a norma ECSS-Q-ST-30-11C Rev.2 DIR1 -Space product assurance - Derating - EEE components, 19 May 2020.



3.2.2. Avaliação de componentes

Caso os dados sobre o componente EEE não sejam suficiente, é necessário realizar uma avaliação para determinar se o mesmo está em conformidade com os requisitos de desempenho funcional, qualidade, confiabilidade e resistência ambiental, conforme os requisitos do projeto e aplicação prevista do componente. As avaliações devem ser realizadas por amostragem do lote de componentes, onde será feito a avaliação do fabricante de componentes, análise estrutural, teste de avaliação, teste de vida, tensão mecânica, estresse ambiental, teste de capacidade de montagem e teste de radiação, para dose total e sensibilidade aos efeitos de evento único.

3.2.3. Aprovação de componentes

A aprovação do componente leva em consideração todos os dados obtidos, como desempenho elétrico e ambiental, bem como a qualidade estabelecida e os requisitos de confiabilidade. Para a utilização de componentes qualificados que necessitam de controles adicionais (precap, buy-off, LAT ou LVT, RVT, DPA), ou estejam fora dos limites especificados, ou não atendam ao nível de qualidade dos requisitos de componentes, é necessário o PAD (Parts Approval Document) ou PAR (Parts Approval Request). Os dados de radiação (como RVT) são importantes para a aprovação do componente para a missão e mais detalhes sobre o processo serão descritos a seguir.

3.3. Processo RHA (Radiation Hardness Assurance)

Para entendermos melhor o que é Radiation Hardness Assurance ou em português, Garantia da Dureza da Radiação, é interessante entendermos o significado da palavra hardness nesse contexto, que significa uma condição de resistência física de um sólido a uma força aplicada. Portanto, o processo de RHA reúne todas as atividades realizadas para garantir que os componentes EEE sejam resistentes à radiação do ambiente espacial.

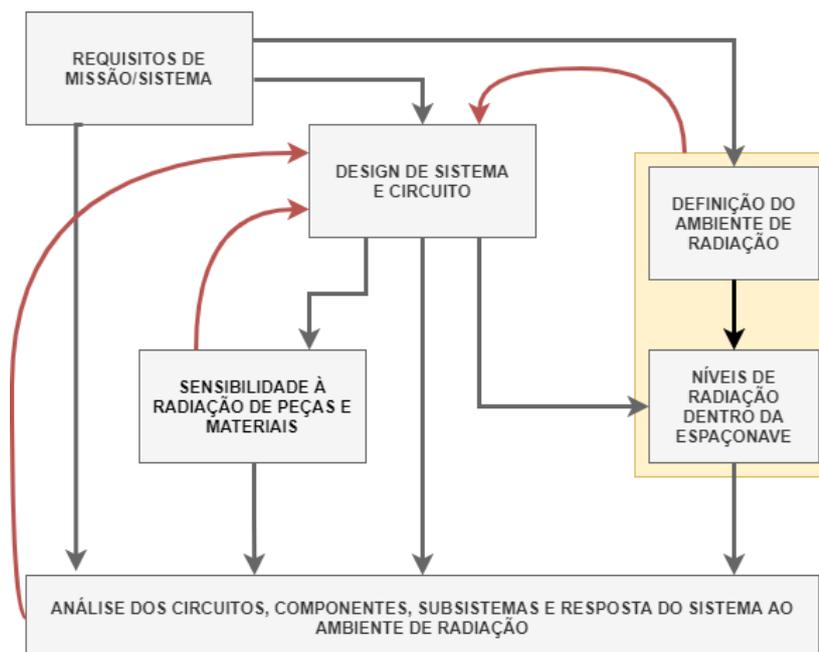


Figura 2. Visão geral do processo RHA. [ESA ECSS-Q-ST-60-15C, 1 October 2012].



A análise é feita com a perspectiva do sistema por inteiro, baseada nos requisitos de missão no contexto do RHA, onde são feitos novos estudos e os requisitos de radiação para o sistema podem ser refinados. Isto tem implicações nos requisitos de operações do sistema, no projeto do circuito do sistema e dos subsistemas e até no layout do satélite.

Podemos observar na

Figura 2, o processo RHA segue uma abordagem interativa de cima para baixo. O processo inicia com os requisitos de alto nível derivados da especificação do ambiente da missão: os requisitos da missão, onde é definido o ambiente em que o sistema desempenhará a sua missão e os requisitos de sistema, permitindo calcular e definir o ambiente de radiação da missão (destacado em laranja, fig. 2), e com dados do projeto do sistema e dos circuitos, permitindo calcular o nível de radiação dentro da espaçonave.

Esses dados realimentam a atividade de “design de sistema e circuitos” para realizar a análise de radiação no nível de equipamento, verificando se há medidas de mitigações ou modificações necessárias a serem planejadas. O mesmo acontece com a atividade “sensibilidade à radiação de peças e materiais”, onde são geradas informações sobre sensibilidade dos componentes quanto à radiação e são analisados os impactos no desempenho do equipamento, através da análise da disciplina específica ou análise de Monte Carlo.

E a atividade “análise dos circuitos, componentes, subsistemas e respostas do sistema ao ambiente espacial”, onde são analisados todos os dados gerados pelas atividades anteriores e confrontados com os requisitos de missão e de sistema, realimentando as demais atividades para refinar o projeto. O processo será finalizado ao se obter resultados que comprovem que o projeto eletrônico do equipamento cumpre com seus requisitos nas condições exigidas pelo ambiente de missão, cumprindo com a margem de projeto de radiação (RDM), isto é, o projeto é validado para a sua missão.

3.3.1. Avaliação dos efeitos da radiação

Temos três grupos de efeitos da radiação, os quais são classificados pelos efeitos gerados no material que compõem os componentes EEE, e assim, causando diferentes efeitos no comportamento elétrico dos componentes. Abaixo temos a descrição de cada grupo:

3.3.1.1. Dose total ionizante

Dose Total Ionizante ou em inglês, Total Ionization Dose (TID) é a energia depositada por unidade de massa de material como resultado da ionização. [ECSS-E-ST-10-12C]

O TID é um efeito acumulativo que gradualmente degrada componentes ópticos, BJT, CMOS e materiais passivos, através do acúmulo de cargas nas camadas isolantes que leva a comportamentos anômalos, perda gradual de desempenho e por fim, a falha. Em dispositivos semicondutores, os efeitos de TID são devidos à criação de pares de elétron-buracos dentro de camadas dielétricas causado pela incidência da radiação no material.

Para avaliar os danos causados pelo TID, os valores paramétricos do componente, importantes para o funcionamento do circuito, são avaliados em testes e após esta avaliação é definida uma margem de projeto de radiação (RDM). E esses dados em conjunto com outros aspectos críticos com respeito ao desempenho e os parâmetros críticos



do circuito, são entradas para a análise do pior caso (WCA), utilizado para demonstrar se o equipamento funciona dentro de suas especificações, apesar das variações em seus parâmetros no ambiente de missão, no período de sua vida útil.

3.3.1.2.Dano por deslocamento (DD) ou Dose total não ionizante (NIEL)

O dano por deslocamento (DD) ou Dose total não ionizante (non-ionizing energy loss - NIEL), é um efeito de dano acumulativo gerado pela radiação, causando dano à estrutura cristalina de semicondutores e alguns materiais ópticos por colisões de partículas energéticas (nêutrons, prótons, elétrons, partículas α , íons pesados e elétrons secundários produzidos por fótons de alta energia). Isso cria centros de defeitos estáveis dentro da banda de gap, dando origem a efeitos que dependem da temperatura, concentração de portadores e da localização do efeito no componente.

Para avaliar os danos causados pelo NIEL ou DD, os valores elétricos paramétricos do componente, os que são importantes para o funcionamento do circuito, são derivados dos níveis de DD com uma margem de projeto de radiação (RDM) e levados para o WCA para análise.

3.3.1.3.Efeitos de evento único (SEE – *Single Event Effect*)

O SEE surge da interação de partículas (prótons, nêutrons ou íons pesados) com o semicondutor. Um único íon energético passa pelo semicondutor e produz uma trilha de ionização em uma região sensível do componente. O efeito depende da quantidade de energia depositada na região sensível, podendo causar efeitos destrutivos (ou potencialmente destrutivos) ou efeitos transitórios.

O SEE é geralmente analisado durante os Efeitos do Modo de Falha e Análise de Criticidade (FMECA), onde o impacto operacional de cada de cada componente sensível é analisado e sua criticidade é avaliada com base na taxa de ocorrência do SEE levando em consideração o RDM.

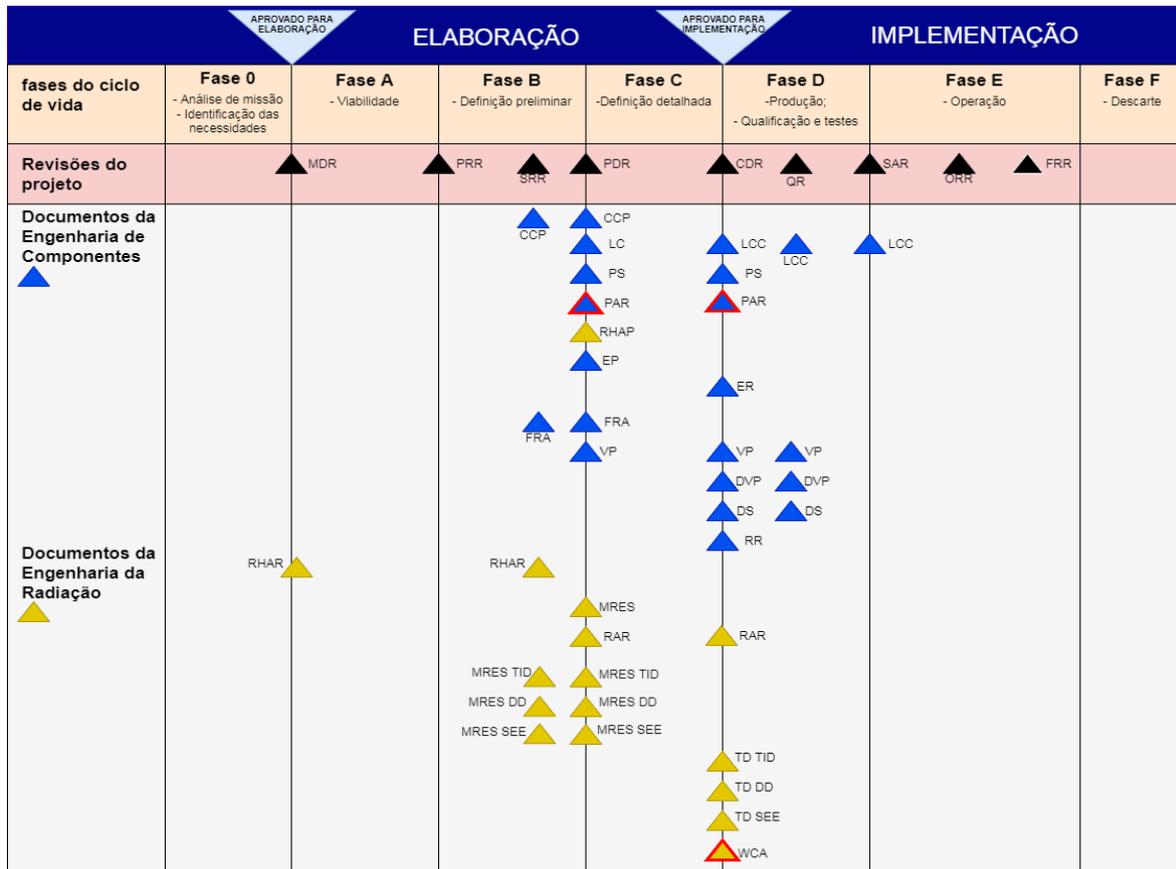
3.3.2.O RHA ao longo das fases de um projeto espacial

Um conceito fundamental usado para a gestão de sistemas espaciais é o ciclo de vida de projetos, onde é categorizado tudo que deve ser feito para realizar o projeto em fases distintas, os quais são separados por pontos de decisão, onde uma comissão especializada avalia a prontidão do projeto para que se possa avançar para a próxima fase. Essa decomposição do ciclo de vida do projeto em fases organiza todo o processo em partes mais gerenciáveis e possibilitando uma visibilidade incremental do progresso. Na Figura 3 temos os documentos da engenharia de componentes e engenharia da radiação e os prazos de entregas dos documentos.

Todas as revisões previstas no ciclo de vida do projeto, desde os PDRs (todos os níveis) a CDRs (todos os níveis), os QRs (todos os níveis) e SRR, recebem um pacote de dados de revisões do projeto contendo as os relatórios de análise de radiação de equipamento, subsistema e sistema.



Os dados e testes de radiação de componentes EEE são revisados durante o em PCBs e PMPCBs através do processo de PAR, que é apenas uma aprovação provisória, pois o aceite final do componente EEE para a utilização no projeto é feito quando a análise de radiação do equipamento correspondente e os relatórios WCA são aprovados.





▲	MDR	<i>Mission Definition Review</i>	▲	FRA	<i>Feasibility and risk assessment report</i>
▲	PRR	<i>Project Requirements Review</i>	▲	VP	<i>Verification Plan</i>
▲	SRR	<i>System Requirements Review</i>	▲	DVP	<i>Design validation plan</i>
▲	PDR	<i>Preliminary Design Review</i>	▲	DS	<i>Detailed specification</i>
▲	CDR	<i>Critical Design Review</i>	▲	RR	<i>Relifing report</i>
▲	QR	<i>Qualification Review</i>	▲	MRES	<i>Mission radiation environment specification</i>
▲	FRR	<i>Flight Rediness Review</i>	▲	RAR	<i>Radiation analysis report</i>
▲	CCP	<i>Component control plan</i>	▲	MRES TID	<i>Mission radiation environment specification - TID</i>
▲	LC	<i>Lista de componentes ou Declared component list (DCL)</i>	▲	MRES DD	<i>Mission radiation environment specification - DD</i>
▲	LCC	<i>Lista de componentes consolidada ou Declared component list (DCL)</i>	▲	MRES SEE	<i>Mission radiation environment specification - SEE</i>
▲	PS	<i>Procurement specification</i>	▲	TD TID	<i>Test Data – TID</i>
▲	PAR	<i>Parts Approval Request ou Part approval document (PAD)</i>	▲	TD DD	<i>Test Data – DD</i>
▲	RHAR	<i>Radiation hardness assurance requirements</i>	▲	TD SEE	<i>Test Data – SEE</i>
▲	RHAP	<i>Radiation hardness assurance plan</i>	▲	WCA	<i>Worst Case Analysis</i>
▲	EP	<i>Evaluation plans</i>			
▲	ER	<i>Evaluation reports</i>			

Figura 3. Principais marcos de revisão de projeto e documentos da disciplina de componentes EEE e radiação, baseado nas normas da ESA.

Caso seja necessário, as análises de radiação do equipamento podem ser realizadas em associação com o PDR do equipamento, onde essas análises são importantes para revisar os dados de testes de radiação disponíveis, podendo ser definido outros testes de radiação para serem realizados, definir ou revisar os planos de teste, revisar a estratégia de blindagem e a análise de blindagem preliminar.

A seguir, temos uma breve descrição das atividades ligadas a RHA e componentes EEE ao longo das fases do ciclo de vida do projeto.

3.3.2.1. Fase 0: Análise da missão, Fase A: Viabilidade

Durante essas fases, o ambiente da missão é definido e os requisitos de radiação de alto nível podem ser derivados, permitindo que os requisitos de RHA (RHAR) possam ser definidos, com adaptação às necessidades específicas do projeto. Podem ser iniciados estudos preliminares sobre a caracterização de radiação para auxiliar em outras atividades do projeto.

3.3.2.2. Fase B: Definição preliminar

É necessário que os requisitos do ambiente da missão e do RHA (RHAR) sejam finalizados até a revisão de requisitos do sistema e uma versão preliminar é dos requisitos de ambiente para a missão no contexto TID (MRES TID), DD (MRES DD) e SEE (MRES SEE) são apresentados nesse marco.



Também temos o projeto eletrônico e o layout da espaçonave definidos, fornecendo dados importantes para as análises preliminares sobre a blindagem, complementando os dados de entrada das atividades de caracterização de radiação.

Na PDR, devem ser apresentados a versão final do RHAP, MRES TID, MRES DD e SEE MRES SEE, assim outros documentos relacionados a componentes EEE, que utiliza os dados dos estudos realizados sobre radiação.

3.3.2.3.Fase C: Definição detalhada

Durante essa fase são realizados testes de caracterização de radiação, onde são feitas análises da blindagem do equipamento e análises de projeto de circuito dos equipamentos. Essas análises de radiação e os relatórios WCA devem ser fornecidos no pacote de dados CDR do equipamento, onde é analisado o impacto do efeito da radiação no nível do equipamento, e caso seja necessário, é analisado nos níveis superiores (subsistema e sistema) e documentado nos pacotes de dados CDR dos níveis superiores.

3.3.2.4.Fase D: Produção e qualificação

Durante a fase de produção e qualificação, no geral, as atividades ligadas ao RHA são testes de radiação em lotes de componentes EEE para o modelo de voo. Caso haja algum problema com os efeitos da radiação nessa fase, resultaria em atividades de redesenho do projeto, o que pode ser impraticável.

4. Conclusão

Como a corrente é tão forte quanto o seu elo mais fraco, o processo de seleção de componente EEE se torna importantíssimo para o sistema espacial, pois irá selecionar os componentes EEE de acordo com a confiabilidade necessária e exigida pelos requisitos do sistema. Através dos requisitos da norma da ESA ECSS-Q-ST-60 - Space product assurance - EEE components, é possível selecionar os componentes EEE com a confiabilidade exigida pelos requisitos do sistema.

É um dos componentes fundamentais do ambiente espacial que afeta os componentes EEE, oferecendo um grande risco para a missão é a radiação, que é abordado na norma da ESA ECSS-Q-ST-60-15C, Space product assurance - Radiation hardness assurance - EEE components, dando requisitos para o planejamento, estudos, testes e análises para garantir que os componentes EEE atendam as especificações do sistema, mesmo em ambiente de radiação espacial.

A maior parte das atividades do RHA que geram maior esforço se encontra no início do projeto, nas fases A e B, pois são atividades de prevenção que garantem a qualidade do sistema, isto é, que o produto funcione adequadamente durante a missão e a garanta a vida útil projetada para o sistema.

***Agradecimentos:** Ao programa de pós-graduação em Engenharia e Tecnologias Espaciais PGETE-INPE e ao CNPq que apoiam o desenvolvimento tecnológico no Brasil.*

Referências

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). Space engineering - Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook. ESA-ESTEC Requirements & Standards



Division Noordwijk, The Netherlands. ECSS-E-HB-10-12A 17 December 2010. Disponível em: <https://ecss.nl/hbstms/ecss-e-hb-10-12a-calculation-of-radiation-and-its-effects-and-margin-policy-handbook/>. 1 de outubro de 2021.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). Space product assurance - Electrical, electronic and electromechanical (EEE) components. ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands. ECSS-Q-ST-60C Rev.2 21 October 2013. Disponível em: <https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-60c-rev-2-electrical-electronic-and-electromechanical-eee-components-21-october-2013/>. Acesso no dia: 1 de outubro de 2021.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). Space product assurance - Radiation hardness assurance - EEE components. ESA-ESTEC Requirements & Standards Division Noordwijk, The Netherlands. ECSS-Q-ST-60-15C 1 October 2012. Disponível em: <https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-60-15c-radiation-hardness-assurance-eee-components-1-october-2012/>. Acesso no dia: 1 de outubro de 2021.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). NASA Export Control Program Operations Manual. NASA Headquarters, Washington, D.C. 20546. NAII 2190.1D October 10, 2017. Disponível em: http://nodis3.gsfc.nasa.gov/NPR_attachments/N_AII_2190_001D_.docx. . Acesso no dia: 1 de outubro de 2021.