



Exemplo de Aplicação de Softwares no Cálculo de *Single Event Upsets* em Grandes Altitudes

Marcelo Tadeu Motta Ferreira¹, Cláudio Antônio Federico², Odair Leles Gonçalves³

^{1,2,3} Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP - Brasil

Resumo - O presente trabalho objetiva demonstrar um exemplo prático da aplicação de softwares de domínio público no auxílio ao cálculo de SEU ("Single Event Upset" - Perturbação de Evento único) em voos de grande altitude. Os softwares aqui utilizados são de fácil utilização e obtiveram boa concordância com dados empíricos obtidos em uma série de experimentos. A metodologia utilizada simplifica a complexidade do assunto no escopo do cálculo de SEU em circuitos integrados digitais. É aplicada a metodologia a um "case" calculando a taxa de SEU de uma memória SRAM e ao final é feita uma comparação entre SEUs em voos subsônicos e hipersônicos, derivando daí uma série de importantes conclusões.

I. INTRODUÇÃO

Com a tendência de projetos voltados para voos comerciais de grande altitude (>60.000 pés), tanto supersônicos quanto hipersônicos, houve um crescimento na preocupação com os efeitos de radiações ionizantes nos sistemas eletro-eletrônicos embarcados, também conhecidos como SEE ("Single Event Effects" - Efeitos de Evento Único). Nessas altitudes, o fluxo dessa classe de radiação é cerca de uma ordem de grandeza maior que na altitude dos atuais voos comerciais. Estes por sua vez apresentam um fluxo 300 vezes maior que a nível do solo [1].

A radiação ionizante presente na atmosfera é produzida através de interações da radiação cósmica primária de alta energia, oriunda do sol ou do espaço profundo, com os átomos da atmosfera. Estas interações criam chuveiros secundários de radiação formados principalmente na troposfera e baixa estratosfera. Em altitudes típicas de voo comercial (~40.000 pés) a componente de nêutrons possui maior influência. Em grandes altitudes a componente neutrônica diminui e prótons e íons pesados passam a ser mais relevantes.

Todas essas partículas por sua vez impactam regiões sensíveis de circuitos integrados causando a coleta rápida de cargas elétricas liberadas e consequentemente os SEEs. Os SEEs podem ocorrer na maioria dos equipamentos eletrônicos a bordo de aeronaves, provenientes da mudança do estado lógico de células de memória, transientes elétricos em circuitos analógicos e danos a componentes de estado sólido, podendo comprometer a segurança de voo [2].

Esse estudo irá se limitar ao SEU, que é uma classe de SEE especialmente impactante em CIs (circuitos integrados) digitais capazes de armazenar informações (memórias, microprocessadores, etc.). O SEU se apresenta como uma alteração, de um ou mais bits, em uma certa posição de memória.

II. SOFTWARES

Ao longo dos últimos 30 anos, vários softwares baseados em códigos de Monte Carlo tem sido escritos para obtenção de perfil de partículas ionizantes na atmosfera e cálculo de SEE em componentes eletrônicos.

A escolha pelo EXPACS e MAIRE nesse estudo está ligada ao fato de serem softwares relativamente recentes, de domínio público, interface simples com o usuário, e empregando códigos de Monte Carlo e modelos de transporte de radiação com alto nível de refinamento.

EXPACS - EXPACS representa "Programa baseado em Excel para cálculo do espectro de raios cósmicos atmosféricos". Ele pode calcular instantaneamente fluxos de raios cósmicos terrestres de nêutrons, prótons, íons com carga de até 28 (Ni), múons, elétrons, pósitrons e fótons quase a qualquer hora e em qualquer lugar da atmosfera da Terra, usando o PARMA - modelo analítico de radiação na atmosfera baseado em PHITS ("Particle and Heavy Ion Transport code System").

Com base nos fluxos calculados, o EXPACS também pode estimar a dose efetiva, o equivalente de dose ambiente e dose absorvida no ar devido à exposição aos raios cósmicos. Após a versão 4.0, os fluxos diferenciais angulares de raios cósmicos terrestres também podem ser calculados [3].

MAIRE - Modelos para Efeitos de Radiação Ionizante Atmosférica. É um modelo paramétrico baseado em cálculos de transporte de partículas em uma geometria multicamadas da atmosfera usando o Código de Monte Carlo FLUKA ("FLUKtuierende KAskade"). O modelo pode calcular (usando espectros de entrada de GCR, próton originários de Eventos de Partículas Solares (SPE - "Solar Particle Events") ou íons pesados incidente) fluxos de todas as espécies de partículas relevantes, incluindo chuveiros eletromagnéticos (elétrons e fótons) e íons pesados (fragmentos primários e secundários), até uma altitude de 100km.

O código MAIRE pode calcular Taxas de SEU provenientes de ionização indireta devido a prótons e nêutrons usando fluxos de partículas e um cálculo padrão de seções de choque. Além disso, usando os espectros de LET ("Linear Energy Transfer") das partículas, o modelo também pode calcular taxas de SEU de íons usando o método IRPP ("Integral Rectangular Paralelepiped"). Neste método, o espectro de LET integral, combinado com a distribuição do percurso da partícula através uma representação de paralelepípedo do volume sensível do dispositivo, calcula a taxa de SEU esperada para o mesmo [4].

III. METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO SEU

1 - Cálculo do espectro de fluxo diferencial ou integral no EXPACS ou MAIRE. O EXPACS leva em consideração a blindagem da aeronave.

No MAIRE:

2 - Carregamento de tabelas Fluxo Diferencial x Energia do EXPACS ou opcionalmente definir coordenadas.

3 - Entrada dos parâmetros da função de Weibull da seção de choque ou opcionalmente carregamento da tabela Seção de Choque x Energia (ou LET para íons pesados). O software então realiza o cálculo da taxa de SEU.

4 - Repetir os passos de 1 a 3 para cada altitude e para cada tipo de partícula de interesse. No caso de voos de alta altitude: nêutrons, prótons e íons pesados.

5 - Calcular taxa de SEU devido a cada partícula e somar para obter a taxa de SEU total vs altitude.

6 - A trajetória da aeronave deve ser segmentada e uma taxa de SEU calculada para cada segmento. Obtém-se a quantidade de SEUs do voo multiplicando-se a taxa de SEU de cada segmento pelo tempo de duração do segmento.

IV. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

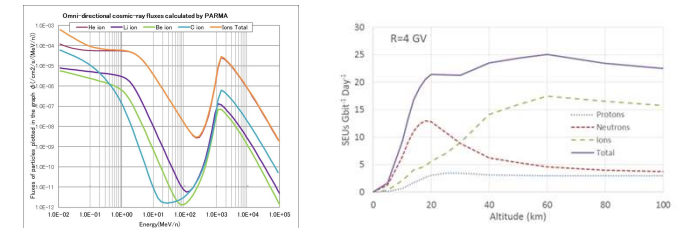


Fig. 1 - À esquerda espectro do fluxo diferencial de íons em função da energia, para as condições de contorno do exemplo (altitude 38km), gerado pelo software EXPACS. À direita plotagem da Tx SEU vs altitude para cada tipo de partícula e para o total de partículas (adaptada de [5]).

No exemplo, se calculará a taxa de SEU de uma memória SRAM HITACHI (p/n HM628512ALP-7) de 4 Mbits, seguindo os passos mostrados na seção III e utilizando os softwares EXPACS e MAIRE.

A Fig. 1 a esquerda mostra o resultado do passo 1. Do lado direito temos a plotagem das taxas de SEU x altitude para cada partícula e o total, obtida pela repetição dos passos 1 a 3 para cada partícula de interesse em várias altitudes.

Como exemplo de cálculo de SEU em trajetórias segmentadas, relativo ao passo 6, utilizou-se os parâmetros do voo Los Angeles-Sidney [1,6], calculando as taxas de SEU médias (Tx SEU) em 3 diferentes segmentos do voo: subida, cruzeiro e descida.

Voo hipersônico na rota Los Angeles - Sidney (12.074 km):

$$\text{SEU total} = 0.5h \times \text{Tx SEU}_{\text{sub}} + 1.6h \times \text{Tx SEU}_{\text{cr}} + 0.5 \times \text{Tx SEU}_{\text{des}} \\ = 0.5 \times 11.7 + 1.6 \times 4.9 + 0.5 \times 13.4 = 20.39/\text{Gbit} = 0.082/\text{memória}$$

Comparando com o voo subsônico na mesma rota:

$$\text{SEU total} = 0.5h \times \text{Tx SEU}_{\text{sub}} + 12.7h \times \text{Tx SEU}_{\text{cr}} + 0.5 \times \text{Tx SEU}_{\text{des}} \\ = 0.5 \times 0.48 + 12.7 \times 3.25 + 0.5 \times 1.5 = 42.27/\text{Gbit} = 0.17/\text{memória}$$

Com relação ao uso de códigos computacionais, uma vez que o componente seja completamente caracterizado em ensaios de feixes de partículas, o processo se torna automatizado sem a necessidade de novos testes, seja em solo ou em grandes altitudes. Dessa forma reduz-se os custos e tempo de avaliação.

V. CONCLUSÃO

Observa-se no exemplo uma redução pela metade na ocorrência total de SEU no voo hipersônico, quando comparado no mesmo trecho de voo subsônico. Isto ocorre pelo fato da significativa redução no tempo de exposição que, no caso apresentado, passando de 13,7h para 2,6h. No entanto, se a aeronave hipersônica for escalada para um bloco de horas de voo anual semelhante a subsônica, essa vantagem desaparece [6].

Usando a analogia com taxas de falha padrão utilizadas no "Safety Assessment" da aviação, sempre informadas em falhas/hora de voo, podemos concluir que o voo em grandes altitudes, e o hipersônico em particular, trará novos desafios ligados a segurança da aviação.

REFERÊNCIAS

1. Bauhaus Luftfahrt e.V., Cosmic Radiation Exposure of Future Hypersonic Flight Missions, Germany, 2016.
2. A.C.M. Prado; M.A. Pereira; C.A. Federico; O.L. Gonzalez. Estudo de caso sobre o efeito da radiação cósmica em sistemas embarcados em aeronaves. In: Brazilian Journal of Radiation Sciences 03-1ª (2015) 01-22, Brasil, 2015.
3. EXPACS (<https://phits.jaea.go.jp/expacs>).
4. MAIRE (<https://www.radmod.co.uk/maire>).
5. Hands, Alex et al, New Data and Modelling for Single Event Effects in the Stratospheric Radiation Environment, IEEE Transactions On Nuclear Science., July 10th, 2016.J. Clerk Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism", 3ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, p.68-73.
6. L. Koops et al, Relevance Of Cosmic Radiation Exposure For Hypersonic Flight. In: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014.