

EFEITOS DA ANOMALIA DO ATLÂNTICO SUL (AAS) EM SATÉLITES DE ORBITA BAIXA

Thiago Augusto do Carmo, Dr. Silvio Manea

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

thiago.carmo.eng@gmail.com, silvio.manea@inpe.com

1. Introdução

A anomalia do atlântico sul em satélites de órbita baixa, tem o real potencial de causar danos ao equipamento e como consequência reduzir a vida útil, ou leva a perda catastrófica da missão para a qual foram desenvolvidos. O presente estudo visa abordar os principais efeitos prejudiciais à saúde do equipamento a fim de mitigar a radiação absorvida e os possíveis danos causados por prótons, elétrons e nêutrons secundários, e ampliar o entendimento em relação a anomalia do atlântico sul, assim como a real necessidade de operar equipamentos dentro da área de efeito da anomalia. Para tal efeito, é utilizado software capaz de simular o ambiente espacial ao qual a nave é submetida, sendo ele o Mullasis. A operação de naves cuja altura mínima é de 400 km, estas chegam a interagir com partículas altamente energizadas com aproximados 23MeV. Estas partículas podem causar Single Event Effect em componentes elétricos e degradação por superaquecimentos da blindagem em relação ao contato com o Oxigênio atômico (O^+), quando a nave assume velocidade de 7 km/s e prótons, sendo estes feitos de caráter destrutivo ou não destrutivo. Esta interação se dá pela redução do campo magnético na região sul do planeta, chegando a medir 24.000 nT.

Satélites com um modelo de operação em baixas altitudes, tende a trabalhar em sistema de órbita polar, pois o objetivo desta abordagem é reduzir o tempo de exposição à radiação. Por consequência da inclinação do equipamento em relação ao eixo de rotação da terra, há uma órbita que o satélite tende sempre a cruzar com a linha do equador, e sempre no mesmo horário específico, esta é chamada de heliossíncrona, orbitas como esta, tende sempre a transitar pela região da anomalia do atlântico. Para o Brasil, há um grande interesse em manter o imageamento desta área, porém existe o risco de ocorrerem falhas nos sistemas do satélite. Logo, para que os efeitos da radiação no equipamento sejam reduzidos, é realizado testes nos componentes e aplicar proteção nas partes de grande importância. Logo, componentes com grande capacidade de operar em ambiente radioativo dente a possuir menor capacidade de operação (LIU, 2019).

2. Anomalia do atlântico sul (AMAS ou SAA)

A Anomalia do Atlântico Sul, South Atlantic Anomaly (SAA) ou Anomalia Magnética do Atlântico Sul, trata-se de uma região onde a radiação derivada do ambiente espacial tem maior intensidade em baixas altitudes em relação ao nível do mar, dada a interação com o cinturão de radiação (Van Allen) que circunda a terra junto ao o campo magnético da terra. Nesta ocasião o cinturão está posicionado com inclinação de -11° em relação ao eixo de rotação do planeta terra, isso o torna simétrico em relação ao eixo magnético. Porém, o eixo de rotação e campo magnético da terra são assimétricos. Com efeito, a porção interna do cinturão de Van Allen encontrasse posicionado sobre a região sul do planeta e mais distante da região norte. A região sobre a América do Sul mostra valores de campo magnético inferior as demais regiões do planeta, sendo medido intensidade de campo a valores próximos a 24.000 nT (Nano Tesla) a uma altitude de 700 Km (HEIRTZLER, 2002) (BADHWAR., 1997).

Segundo Ginet, 2007. A região de cobertura da SAA possui altitude inicial com efeitos relacionados a prótons altamente carregado em 400 km de altitude e se estende até a 1700 km. Dentro deste alcance, foi medido energia equivalente das partículas de prótons em 23MeV a $> 94\text{MeV}$ em decorrência da variação de altitude.

Com altitude de 850 km e fluxo de prótons superiores a 38 MeV, a SAA toma proporções de tal modo a ganhar área de radiação, chegando a cobrir toda a região da América do Sul e parte do Sul do Continente Africano. Seu centro de ação está localizado sobre o Brasil, mas precisamente na cidade de São José dos Campos/São Paulo. O ápice da anomalia se dá com altitude próximo a 1700 km. Como consequência do ganho de elevação, sua área se estende por toda a linha equatorial do planeta e possui fluxo de prótons superiores a 94 MeV.

3. Danos a Eletrônica

Avaliando os efeitos da anomalia do Atlântico Sul em satélite de orbita baixa, podemos destacar eventos simples de solucionar e outros comprometedores a missão do equipamento. Quando ocorre a travessia do equipamento por uma área crítica de radiação sem a devida proteção, normalmente executa-se manobras onde se desativa as funções não necessárias para a execução da travessia da região com radiação ionizante.

Problemas que podem ocorrer de forma instantânea no equipamento eletrônico quando a radiação local tende a sobrepor os limites de teste do componente são conhecidas como Total Ionizing Dose (TID), e chamado de Single Event Effect (SEE), a partir destes, podemos ter efeitos não destrutivos como Single Event Upset (SEU), Single Event Transient (SET), Single

Event Hard-error (SHE) e destrutivos, tais como SEL (Single Event Latchup), SEGR (single Event Gate Rupture), SEB (Single Event Burnout) (GLEDHILL, 1976).

De forma não destrutiva os SEUs ou Soft erro, tendem a não ser destrutivos para os componentes, mas quando existe a ocorrência deste evento, quando não detectado a tempo, pode ocorrer comprometimento da missão em casos onde o equipamento inicia uma manobra não autorizada. A ocorrência de um SEU em um componente de memória, este, altera o tipo de informação armazenada, em outras palavras: Quando um Bit por natureza é zero “0” e o armazenamento indica desligado, quando ocorre a interação de uma partícula diretamente no componente, o Bit que antes era Zero passa a ser um ‘1’ ou seja, ligado, em outras palavras, uma função do equipamento não requisitada pela operação antes dada como “False” torna-se “True”. Quando ocorre o SEU em sistema de armazenamento de informação o efeito pode levar a perda dos dados por SHE. Este evento quando detectados a tempo, podem ser solucionados com o reiniciar das funções (Gadlage et. Al 2004) (Mavis et. al. 2001).

Os SEEs quando causados por ions/partícula pesada, transfere corrente ao passar pelo componente quando polarizado, conhecido com linear transfer energy ou (LET), levando o componente a mudar sua forma de operação, gerando a perda total do componente. Prótons possuem linear energy transfer muito baixo para que ocorra o SEEs, logo, o processo derivado destas partículas, está voltado ao surgimento de partículas secundárias carregadas tais como íons pesados, e quando em contato com componentes com base em silício, ocorre a deposição de energia no componente gerando o SEE (Gadlage et. Al 2004). A passagem de um íon pesado por um componente do tipo MOSFET tem o potencial de ativar o componente quando o mesmo encontrasse desligado, fazendo com que o source venha atuar como emissor, seu p-body atue como base e epidaxial layer como coletor, esta inversão provoca o aumento da corrente no componente levando ele a falha. Este evento é conhecido como SEB (LIU, 2006).

4. Danos a blindagem

Danos do tipo estruturais envolvendo a blindagem, também pode ser observado em satélite, desta forma, é incorporado a parte externa da nave matérias capazes de resistir temperaturas extremas, colisões e processos químicos derivados do ambiente espacial. A blindagem pode ser composta de alumínio, carbono, tungstênio ou polietileno. A combinação de matérias resulta em uma estrutura capas de suportar ambientes extremos com temperaturas de aproximadamente 2000°C quando composta por Carbono (LIU, 2019). Porém o carbono,

quando exposto sem tratamento ou auxílio de outros elementos em sua composição, pode vir a apresentar degradação após a exposição de 500 horas com raios Ultravioletas (KUMAR, 2002).

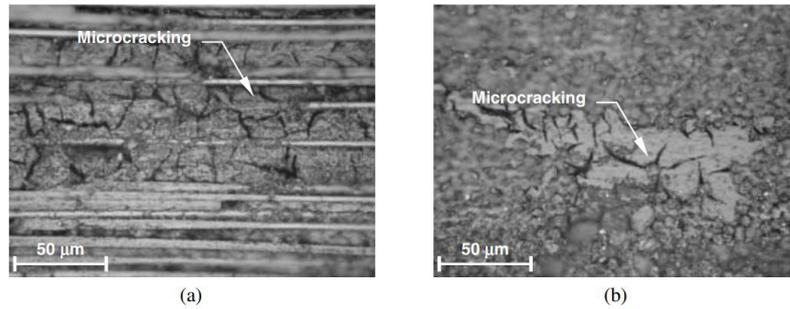


Fig. 1 Micrografias ópticas após 500 h de exposição à radiação UV: (a) borda de um espécime em alta ampliação; (b) borda de um espécime em alta ampliação. Fonte: KUMAR (2002)

Em orbitas cujo o satélite tende a sobrevoar com altitudes entre 150 a 700 km, segundo Gadlage 2004, átomos de oxigênio (AO) entram em contato com a superfície do equipamento em aproximadamente 7 km/s, esta colisão direta é capaz de gerar energia superiores a 5keV por AO. Desta forma, AO tendem a ser extremamente oxidativos a estruturas externas quando há transição em orbitas baixas LEO (Low Earth Orbit).

Avaliando a Micromorfologia da superfície do material mostrado na figura 2.a, podemos observar a estrutura de Carbono original sem nenhum dano aparente. Após a interação com a radiação AO durante 30 horas de exposição (Figura 2.b), é possível observar danos corrosivos devido a interação com o Oxigênio atômico, o mesmo ocorre na figura 2.c. porém à interação de prótons somadas as de AO, tende a potencializar o processo corrosivo sobre a superfície do material C/C. Para a exposição do material na figura 2.b o processo corrosivo para dado estudo, foi capaz de reduzir a superfície em 3µm (GADLAGE, 2019).

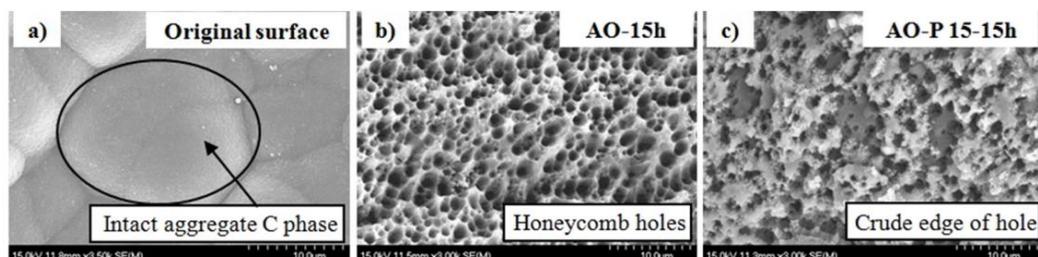


Fig. 2 Micromorfologia da superfície C / C em processo de ascensão orbital. a) superfície original, b) Após AO-30 h de exposição, c) Após AO-P 15-15 h de exposição. Fonte:

GADLAGE (2019)

5. Simulação Mulassis/SRIM & Dados reais

Mulassis (Multilayered shielding simulation software) trata-se de um software capaz de realizar simulações de partículas radioativas em diversos materiais, ele é comumente usado para realizar simulações em camadas de blindagem a fim de avaliar o comportamento do material em ambiente de extrema exposição à radiação, da mesma forma o SRIM trata-se de uma coleção de pacotes de software que possuem a capacidade de calcular o transporte de íons na matéria (LEI, F. et al 2002).

Segundo Emmanuel et al 2016, foi construído três camadas compostas por alumínio (Al), Polietileno (PE) e fibra de carbono composta (CFC), onde foi realizado o estudo experimental referente a submissão da blindagem em ambientes composto por partículas de prótons e elétrons, sendo posteriormente comparado os resultados coletados de forma experimental aos dados simulados entre o Mulassis e SRIM. As doses simuladas para prótons foram equiparadas as coletadas no satélite Russo Molniya. Sendo 70 MeV e uma fonte ciclodron para medir a dose ionizante total depositada (TID). Para elétrons, foi usado um acelerador de partículas de 10 MeV para determinar o TID. Desta forma, foi possível observar a deposição de 7% de prótons quando comparados com dados simulados, e para elétrons 2 – 74% da blindagem de até 10 mm.

A deposição de partícula de prótons para o material apresentado neste estudo, foi de 1,6 mm a 6,4 mm de espessura de alumínio, onde ocorreu deposição de prótons entre 0,43 e 1,73 $g.cm^{-2}$ respectivamente. Para o polietileno, 1,05 mm de camada e deposição de 0,0999 $g.cm^{-2}$ e fibra de carbono composta com espessura de 0,58 mm e deposição de 0,087 $g.cm^{-2}$. Para simulações realizadas em software (Mulassis), os resultados se mostraram bastante efetivo quando à densidade de até 6% em relação aos dados obtidos de forma experimentalmente para PE, CFC, 5,94% e 1,64% respectivamente. Sendo o alumínio com menor densidade (Twt). Para maior extração dos resultados em relação a absorção de prótons, a blindagem deve ser composta em sequencial Al/CFC/PE. A comparação entre o Mulassis e Srim, mostra similaridade na obtenção dos resultados para PE, CFC e Al, 1,75%, 3,9% e 5,4% respectivamente, observado pequena diferença no incremento de 1 MeV realizado pelos cálculos em SRIM relacionado a correções, em quanto que o Mulassis não realiza a fim de facilitar os cálculos realizados (EMMANUEL ET. AL., 2016).

6. Considerações finais

É possível afirmar que regiões dentro da anomalia do atlântico sul entre 400 a 1700 km, tendem a ser extremamente agressivas para equipamentos não preparados para operar nesta região, tendo em vista a exposição à radiação no cinturão de Van Allen em baixa altitude, e ao

contato com átomos de oxigênio (AO). Os eventos relatados no desenvolvimento do presente estudo tais como SEE, TID ou derivados, podem ocorrer em outras altitudes e orbitas distintas, como por exemplo a região de orbita equatorial, que apresente radiação elevada quando dentro da área interna do cinturão de radiação a uma altitude equivalente a 1000 km e com uma curva característica de energia por prótons de $> 38\text{MeV}$. O processo de mitigação de prótons utilizando em uma blindagem composta por alumínio, polietileno e carbono, pode se mostrar viável, uma vez que através do processo de simulação se obteve 6% de absorção de prótons enquanto que dados reais foram obtidos 7% segundo Emmanuel et al., 2016. Ou seja, as camadas quando sobrepostas umas as outras tendem a reduzir o efeito direto do oxidante UV no carbono. Sendo assim, conhecendo a anomalia é possível avaliar extremos e desenvolver soluções que possam suportar na absorção das partículas de prótons e reduzir a oxidação da blindagem quando exposta a radiação ionizante.

7. Referencial

HEIRTZLER, James R. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, n. 16, p. 1701-1708, 2002.

BADHWAR, Gautam D. Drift rate of the South Atlantic anomaly. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 102, n. A2, p. 2343-2349, 1997.

GLEDHILL, J. A. Aeronomic effects of the South Atlantic anomaly. *Reviews of Geophysics*, v. 14, n. 2, p. 173-187, 1976.

GINET, Gregory P. et al. Energetic proton maps for the South Atlantic anomaly. In: 2007 IEEE Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2007. p. 1-8.

GADLAGE, M. J., SCHRIMPF, R. D., BENEDETTO, J. M., EATON, P. H., MAVIS, D. G., SIBLEY, M., ... TURFLINGER, T. L. (2004). *Single event transient pulse widths in digital microcircuits. IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51(6), 3285–3290

MAVIS, David G.; EATON, Paul H. SEU and SET mitigation techniques for FPGA circuit and configuration bit storage design. In: 2001 MAPLD International Conference. 2001.

LIU, Sandra et al. Single-event burnout and avalanche characteristics of power DMOSFETs. *IEEE transactions on nuclear science*, v. 53, n. 6, p. 3379-3385, 2006.

LIU, Guanghai; CHENG, Laifei; LUAN, Xingang. Radiation damage behavior of carbon/carbon composite in Low Earth Orbit environment. *Ceramics International*, v. 45, n. 13, p. 16088-16096, 2019.

KUMAR, Bhavesh G.; SINGH, Raman P.; NAKAMURA, Toshio. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation. *Journal of Composite materials*, v. 36, n. 24, p. 2713-2733, 2002.

Emmanuel, A., Raghavan, J. Experimental validation of simulations of radiation shielding effectiveness of materials by MULASSIS. *Adv. Space Res.* (2016),

LEI, F. et al. MULASSIS: A Geant4-based multilayered shielding simulation tool. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, v. 49, n. 6, p. 2788-2793, 2002.