



Frameworks para seleção das técnicas de mitigação de falhas causadas pela radiação espacial em FPGAs COTS

BARBOSA, A.L.¹, LOUREIRO, G.², MANEA, S.³,
DUARTE, J.M.L.⁴, GIULIANI, G.P.⁵

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Doutorado do curso de Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE

²Laboratório de Integração e Testes (LIT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

³Projeto CITAR (Circuitos Integrados Tolerantes à Radiação), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

⁴Centro Regional do Nordeste (GRN), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Natal, RN, Brasil

⁴ Centro Regional do Nordeste (GRN), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Natal, RN, SP, Brasil

eng.adilsonlb@gmail.com

Resumo. *Os sistemas espaciais exigem componentes com qualificação espacial, “endurecidos” contra radiação, e algumas aplicações também requerem dispositivos com alta taxa de processamento. Devido a fatores relacionados à redução de custos dos projetos de sistemas espaciais e ao embargo comercial de componentes e materiais endurecidos, os dispositivos eletrônicos do tipo COTS (Commercial off-the-shelf) passaram a ocupar um espaço relevante na engenharia de componentes, principalmente FPGAs (Field Programmable Gate Array). O engenheiro de componentes necessita considerar técnicas de mitigação de falhas nestes dispositivos e os frameworks apresentados em pesquisas anteriores não abrangem todas as técnicas ou não utilizam métricas para seleção, mas para avaliação e otimização, sendo os dados da bibliografia limitados. O artigo possui como objetivo analisar dois frameworks que foram considerados mais abrangentes em termos de parâmetros necessários para projetos em FPGAs COTS, comentar os pontos fracos e fortes de cada um deles e especificar o que é necessário, segundo os autores, para aperfeiçoá-los.*



Palavras-chave: COTS, Falhas, FPGA, Mitigação, Seleção.

1. Introdução

O espaço é um desafio para área científica, podendo ser considerado estratégico em diversas áreas. Se as pesquisas forem conduzidas com sucesso, podem resultar em benefícios econômicos, tecnológicos e sociais. Porém, a pesquisa na área espacial possui algumas características especiais, como o fato de envolver tanto os aspectos civis como de defesa. Esta característica pode resultar em algumas vantagens, porém pode implicar na restrição do comércio de componentes, dispositivos e materiais utilizados nos sistemas espaciais [OECD, 2014]. Os dispositivos eletrônicos que possuem aplicações na área espacial requerem componentes com qualificação espacial ou de defesa, *hard* ou “endurecidos” contra radiação, e algumas aplicações também requerem dispositivos com alta taxa de processamento. Neste contexto começaram a ter destaque os COTS, que são os componentes disponíveis no mercado para aquisição, porém não foram fabricados para aplicações espaciais. Estes dispositivos apresentam vantagens como os menores custos em relação aos componentes “endurecidos”. Também deve-se considerar os possíveis embargos comerciais de componentes e materiais deste tipo. Devido a estes fatores, os COTS apresentam-se como uma possibilidade viável para atender determinadas demandas de projetos, desde que sofram um processo de adaptação ao ambiente espacial, com a adoção de determinadas técnicas de mitigação de falhas. Além disso, os FPGA COTS apresentam diversos tipos de vantagens técnicas como computação de desempenho avançado, pois apresentam capacidade elevada de paralelização do processamento aritmético, *transceivers* com alta taxa de transferência, baixo consumo de energia e baixo custo, quando comparados com CPUs (*Central Process Unit*) convencionais. (MEDEIROS, 2013).

Para a realização de projetos espaciais, deve-se sempre ter em vista o ambiente hostil do espaço, o qual submete o sistema e seus dispositivos eletrônicos a mudanças bruscas de temperatura, pressão, forças cinéticas e outras situações imprevisíveis. Para os componentes eletrônicos, a radiação é um dos fatores mais relevantes devido ao efeito nocivo desta radiação em um sistema espacial. Estes efeitos nocivos podem prejudicar o funcionamento e/ou causar danos em diversos tipos de componentes eletroeletrônicos como circuitos de processamento de sinais, de comunicação, células solares e materiais semicondutores (PINHO et al., 2016). No caso de FPGA COTS, podem ocorrer danos nos dispositivos eletrônicos que implementam a lógica digital, levando a problemas temporários ou permanentes como *Single Event Effects* (SEE) e *Total Ionizing Dose* (TID) (ESA, 2008).

Caso os FPGAs “endurecidos” tornem-se inviáveis devido aos fatores de custos e embargos mencionados, os FPGAs COTS podem ser utilizados com as devidas técnicas de mitigação de falhas. Estas técnicas estão sendo pesquisadas ao longo do tempo e podem ser citadas como exemplos as que aparecem com maior frequência nos trabalhos científicos, tais como circuitos de proteção (REYNERI et al, 2010), *careful* COTS (SINCLAIR e DAYER, 2013), TMR (*Triple Module Redundancy*), quadruplicação, reconfiguração (PAROBECK, 2013), redundância de FPGAs (CARMICHAEL et al, 1999), códigos de detecção e correção de erros (SHIRVANI et al, 2000), duplicação (KASTENSMIDT et al, 2004), e detector de radiação (LAMERES et al, 2010).



Infelizmente os trabalhos pesquisados na literatura disponível em um período de dez anos, no mínimo, não forneceram detalhes suficientes de projeto, a fim de estabelecer uma comparação das técnicas existentes de forma coerente com os parâmetros necessários. Constata-se, por intermédio da literatura, que os projetos espaciais dependem muito do objetivo da missão, restrições e um *trade-off* entre parâmetros definidos por sistemas específicos e considerados viáveis, os quais são abordados e estabelecidos em cada trabalho existente sobre o tema. Qualquer dispositivo eletrônico que necessite utilizar FPGAs deve funcionar adequadamente com as aplicações da missão e superar as adversidades do espaço, principalmente relacionadas com o efeito da radiação. Qualquer pesquisa sobre o assunto deve servir como uma orientação para os engenheiros de componentes iniciarem o trabalho e estabelecer um caminho que aborde a grande maioria das técnicas, a fim de selecionar a que mais se adapte à missão requerida. No entanto, o resultado final de escolha sempre será da responsabilidade dos engenheiros de sistemas de acordo com seu próprio julgamento e conclusões devido à diversidade de técnicas disponíveis (SIEGLE, 2015).

Um projeto de um sistema de processamento a bordo deve atender ou exceder todas as restrições das missões como uso máximo de potência, taxa máxima de falha e tempo de vida mínimo necessário. Considerando que essas restrições de missão são diferentes e frequentemente conflitantes, há a possibilidade de diversos tipos de soluções, porém estas podem ser estanques, sem estabelecer um fluxograma padrão de procedimentos que possam facilitar o processo de decisão. A escolha do melhor projeto é uma tarefa complexa, mas a experiência do engenheiro de componentes em determinados tipos de soluções é considerada relevante. Porém, estes optam por utilizar dispositivos e técnicas familiares e as restrições de tempo de desenvolvimento, assim como de recursos financeiros, pode limitar o escopo de novas soluções, que atendam melhor o objetivo da missão (WULF et al, 2016).

2. Metodologia

Para avaliar os *frameworks* que abordam técnicas de mitigação das falhas, este trabalho utilizou como referência uma pesquisa bibliográfica a respeito das principais técnicas utilizadas em FPGAs COTS. Os artigos pesquisados foram publicados em periódicos acadêmicos, associações de profissionais e bibliotecas digitais especializadas em ciências, tecnologia espacial, eletrônica e telecomunicações. A partir de técnicas pesquisadas nos últimos dez anos, este artigo se propõe a avaliar os resultados de dois outros artigos considerados relevantes, os quais apresentam *frameworks* para facilitar a escolha de uma determinada técnica que se adapte melhor à sua aplicação e missão.

A análise foi realizada tendo por base os seguintes parâmetros:

- a) Informações sobre FPGAs, tipos de radiação e técnicas de mitigação utilizadas.
- b) Informações sobre o período de coleta de dados e sobre banco de dados.
- c) Modelos de radiação, métricas para seleção e metodologias de decisão.
- d) Abrangência e flexibilidade do *framework* em permitir a atualização constante de novos dados obtidos, após a publicação do trabalho, de forma a refletir as tendências e avanços tecnológicos.
- e) Informações sobre testes e simulações.



3. Resultados e Discussão

Considerando todos os trabalhos científicos pesquisados, dois se aproximaram do *framework* necessário para ajudar no trabalho dos engenheiros de componentes. O primeiro artigo considerado, de Siegle (2015), apresenta informações sobre tipos de FPGAs de determinados fabricantes (Xilinx/Microsemi), os principais tipos de efeitos da radiação (SEE/TID) e algumas técnicas de tolerância a falhas, relacionadas com TMR, códigos de detecção e correção de erros, reconfiguração e duplicação. As informações são obtidas de uma revisão bibliográfica com um período total de dez anos, deixando de considerar os resultados mais antigos. Este artigo apresenta detalhadamente (com diagramas em blocos) os circuitos de alguns exemplos de técnicas e suas aplicações. Para efeito de projetos, o *framework* enfatiza apenas as técnicas de mitigação envolvendo os conceitos de TMR, duplicação (DWC - *Duplication With Compare*) e reconfiguração (*scrubbing*), com um fluxo de decisões que apontam tentativas e não processos de seleção baseados em métricas ou métodos de decisão. Comenta a utilização do CREME96 para efeitos de modelo de radiação, sendo os dados obtidos de revisão bibliográfica. O *framework* possui um comentário maior relativo à interação entre as técnicas de mitigação abordadas, e não estabelece uma ligação com as métricas como missão, potência, confiabilidade e tempo de vida. Este artigo ressalta a importância de simular a operação do dispositivo e das técnicas de mitigação com injeção de falhas, citando os sistemas FLIPPER e FT-UNSHADES, desenvolvidos sob financiamento da ESA (*Europe Space Agency*). Não comenta a possibilidade de o *framework* ser flexível e necessitar de atualizações com a inserção de mais técnicas ou dados atualizados. A seguir, na figura 1, é apresentado o *framework* completo do primeiro artigo.

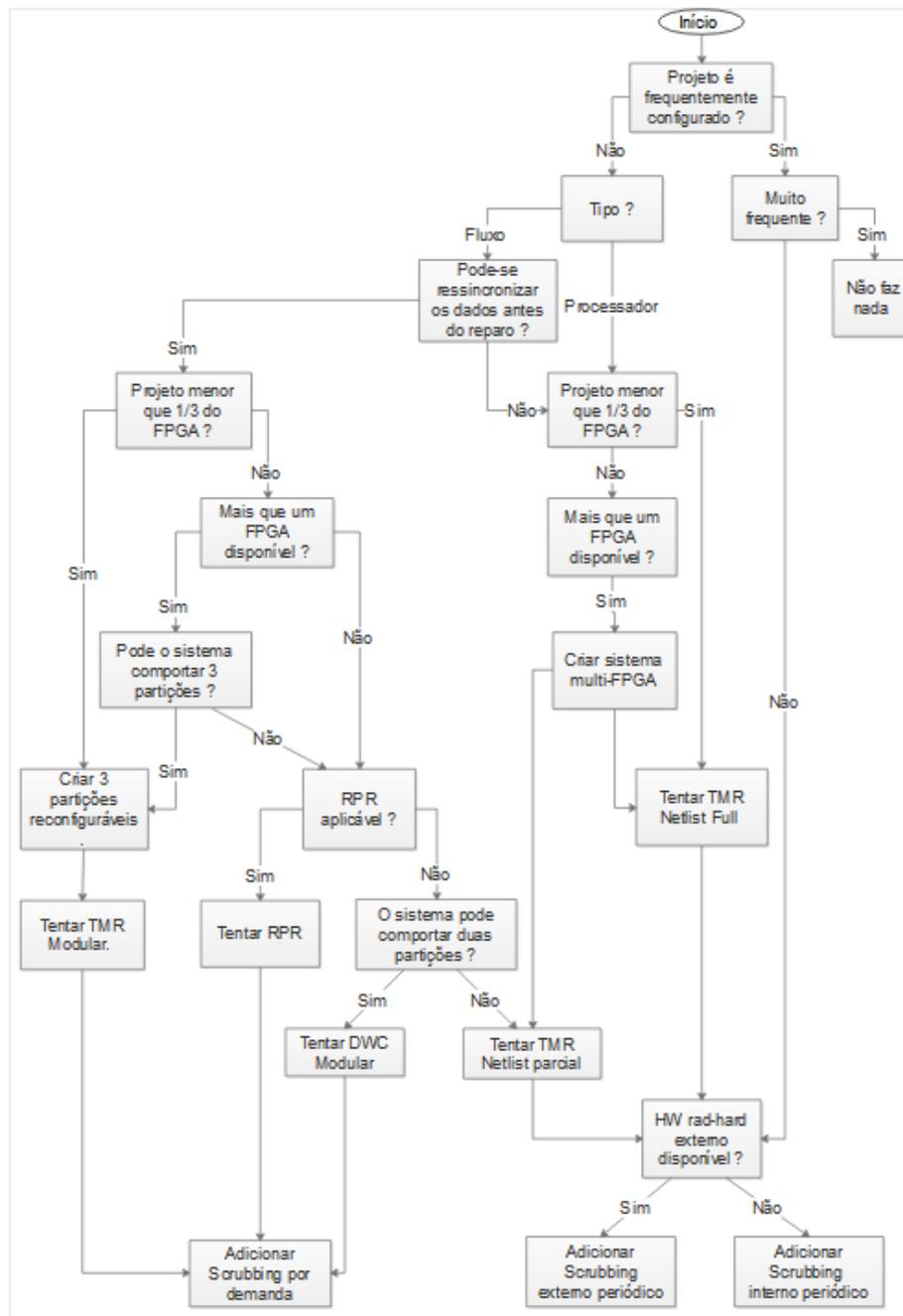


Figura 1. Framework 1 completo. [Fonte: Adaptado de Siegle (2015)]

O segundo artigo, de Wulf et al (2016), possui como objetivo avaliar e otimizar a utilização de FPGAs na área espacial e não se configurou como um *framework* completo para a seleção dos mesmos. Este artigo apresenta como estudo de caso FPGAs da Xilinx, menciona os principais tipos de efeitos da radiação (SEE/TID) e algumas técnicas de tolerância a falhas, principalmente relacionadas a TMR, códigos de detecção e correção de erros e



reconfiguração. Há informações de que utiliza banco dados obtido da literatura, porém não há detalhes sobre o período de coleta de dados e nem sobre esta fonte de informações. O *framework* deste artigo apresenta detalhamento maior sobre a utilização de métricas e uma metodologia de seleção (Pareto-ótimo), porém não esgota o assunto, provavelmente devido a fatores de pesquisa como finalidade e tamanho do artigo. Há informações estantes sobre o fluxo de informações, porém há cálculos específicos das métricas utilizadas para: potência, confiabilidade e vida útil. Faz menção a vários modelos de radiação e alguns exemplos de gráficos obtidos com: CREME96, SHIELDOSE, AE8MAX, AP8MAX e SPENVIS, sem maiores explicações. Há uma ênfase no estudo de TID, a fim de caracterizar melhor a métrica relacionada com o tempo de vida útil. Apresenta um estudo de caso com FPGAs da Xilinx em uma missão de imagem hiperespectral (HSI - *Hyperspectral Imaging*). Somente mencionada a possibilidade de injeção de falhas para testes, não fornecendo mais detalhes sobre o assunto. Porém, ressalta que os dados obtidos dos parâmetros poderão ser complementados com novos dados à medida que as pesquisas evoluam, ou seja, há a possibilidade de atualizações do *framework*. A figura 2 apresenta um *framework* parcial do segundo artigo, utilizando como exemplo a métrica de potência.

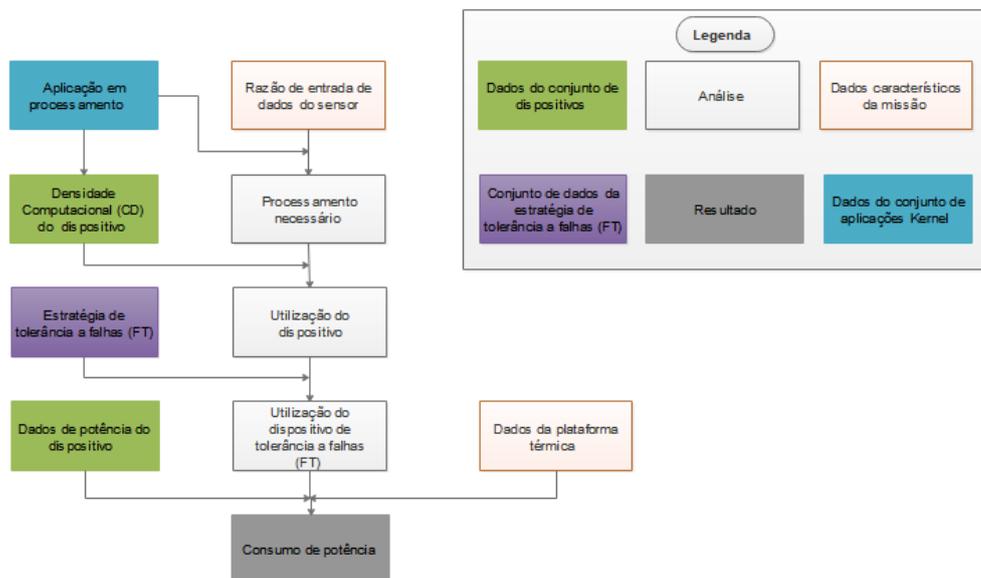


Figura 2 – Framework 2 (métrica de potência). [Fonte: Adaptado de Wulf et al (2016)]

4. Conclusão

Os dois *frameworks* apresentados neste artigo apresentaram resultados parciais em termos de fornecer um apoio aos engenheiros de componentes quanto à mitigação de falhas em FPGAs COTS, causadas pela radiação espacial. Ambos os artigos abordam os dois principais tipos de efeitos da radiação espacial (SEE e TID), porém cada um apresenta ênfase em apenas um deles.



O primeiro artigo apresenta uma revisão da literatura mais abrangente, abordando detalhes de FPGAs de dois fabricantes, algumas técnicas de mitigação, principalmente relacionadas com SEE. O framework apresentado possui o mérito de ser sequencial e didático, porém aborda somente três tipos de técnicas de mitigação (TMR, duplicação e reconfiguração). Também relata um período relativamente reduzido de avaliação bibliográfica de dez anos, deixando de informar se a pesquisa é recente ou não e menciona apenas um tipo de modelo de radiação. O segundo artigo possui a vantagem de apresentar métricas para avaliação e otimização de FPGAs, mas não as utiliza para a seleção dos mesmos. Por sua vez, este artigo aborda um FPGA específico (Xilinx) e algumas técnicas de tolerância a falhas (TMR, códigos de detecção e correção de erros e reconfiguração). Não há detalhes sobre o banco de dados obtido da literatura, a fonte e o período de coleta de dados. Uma vantagem relevante deste *framework* é que detalha métricas (potência, confiabilidade e vida útil) e fornece metodologia de seleção. Faz menção a vários modelos de radiação e seus gráficos e a ênfase no estudo de TID, a fim de caracterizar melhor a métrica relacionada com o tempo de vida útil. Apresenta um estudo de caso com o FPGA analisado e menciona a possibilidade de injeção de falhas para testes.

Assim, o engenheiro de componentes ainda não possui um estudo e *framework* completos que faça uma revisão abrangente sobre FPGAs e técnicas de mitigação, que indiquem todos os passos sequenciais para a escolha destas técnicas, compatíveis com a aplicação e missão. Estudos posteriores deverão inserir em um único *framework* todas as técnicas de mitigação pesquisadas, em um período maior que dez anos, e que considere as métricas definidas como mais relevantes, principalmente a missão espacial. Finalmente, deverão considerar a possibilidade de simulações, testes e atualizações constantes.

Agradecimentos: Ao INPE e Coordenadores, Professores e Colaboradores do ETE/CSE.

Referências

Carmichael, C., Fuller, E., Blain, P. and Caffrey, M. (1999), “SEU Mitigation Techniques for Virtex FPGAs in Space Applications”, in Proc. Military and Aerospace Programmable Logic Device (MAPLD) International Conferences.

Europe Space Agency (ESA) (2008), “Space Engineering - Methods for the calculations of radiation received and its effects, and a policy for design margins (ECSS-E-ST-10-12C)”, Paris, France.

Kastensmidt, F.G.L., Neuberger, G., Hentschke, Carro R.F. and Reis, R. (2004), “Design Fault Tolerant Technique for SRAM Based FPGAs”, in Proc. IEEE Design & Test of Computers, pp. 552-562.

LaMeres, B., Kaiser, T., Gowens, E., Buerkle, T., Price, J., Helsley, K., Peterson, B., Ray, R. (2010), “Position Sensitive Radiation Detector Integrated with an FPGA for Radiation Tolerant Computing”, in Proc. IEEE Sensors, pp. 208-213.

Medeiros, V.W.C. (2013), “fastRTM: Um ambiente Integrado para Desenvolvimento Rápido da Migração Reversa no Tempo (RTM) em Plataformas FPGA de Alto Desempenho”, tese na Universidade Federal do Pernambuco, Pernambuco, Brasil.



Organisation for Economy Cooperation and Development (OECD) (2014), “The Space Economy at a Glance 2014”, Paris, France.

Parobeck, L.S. (2013), “Research, Development and Testing of a Fault-Tolerant FPGA-Based Sequencer for Cubesat Launching Applications”, thesis (MSc) in Naval Postgraduate School, California, U.S.A.

Pinho, M.V., Kraeamer, F. and Soares, I (2016). “FPGAs em aplicações espaciais”, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Santa Catarina, Brasil.

Reyneri, L.M., Sansoè, C., Passerone, C., Speretta, S., Tranchero, Borri, M. and Corso D.D. (2010), “Design Solucion for Modular Satellites Architectures”, Aerospace Technologies Advancements, Book edited by Dr. Thawar T. Arif, pp. 492, Croatia.

Shirvani, P.P., Saxena, N.R., McChuskey, E.J. (2000), “Software Implemented EDAC Protect Against SEUs”, IEEE Transactions on Reability, vol. 49, n° 3, pp. 273-284.

Siegle, F. (2015), “Fault Detection, Isolation and Recovery Schemes for Spaceborne Reconfigurable FPGA-Based Systems”, PhD Thesis in University of Leicester, Leicester, United Kingdom, October 2015.

Sinclair, D. and Dyer, J (2013). “Radiation Effects and COTS Parts in SmallSats”. In: Conference on Small Satellites, 27, Logan U.T., U.S.A., 10-15 August 2013. Proceedings...Logan.

Wulf, N., A.D. George, A.D. and Gordon-Ross, A. (2016), “A Framework for Evaluating and Optimizing FPGA-Based SoCs for Aerospace Computing”, University of Florida, Flórida, E.U.A.